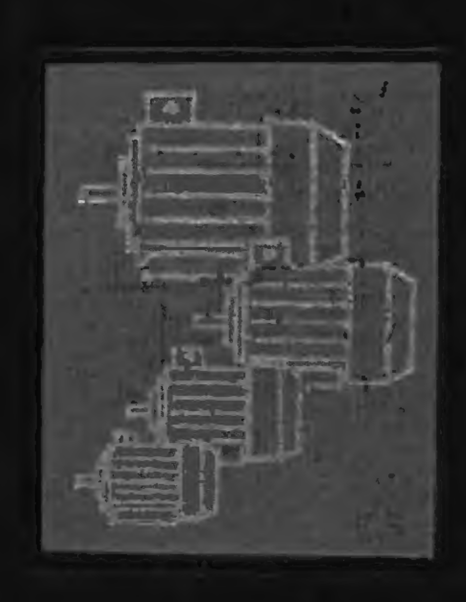
Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕРИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



Я. С. Гурин, Б. И. Кузнецов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕРИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



Москва «Энергия» 1978

ББК 31.261
Г 95
УДК 621.313.001.2

Гурин Я. С., Кузнецов Б. И.

Г 95 Проектирование серий электрических машин.— М.: Энергия, 1978.— 480 с., ил.

В пер.: 2 р. 50 к.

В книге рассматриваются методы и особенности проектирования серий асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока общего назначения мощностью до 1000 кВт, а также отдельных модификаций этих серий. Даются рекомендации по проектированию как отрезков или участков серий, так и отдельных электродвигателей. Приводятся также необходимые требования отечественных стандартов и рекомендации МЭК.

Книга рассчитана на специалистов в области электромашиностроения, эксплуатации электрических машин и электропривода. Она может быть полезна также студентам вузов и техникумов при курсовом и дипломном проектировании электрических машин.

Г $\frac{30307\text{-}361}{051(01)\text{-}78}$ 67-78

ББК 31.261
6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

В электроприводе машин и механизмов используются в основном асинхронные двигатели и двигатели постоянного тока. Доминирующее положение по количеству и общей установленной мощности занимают асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, отличающиеся простотой конструкции и применяемые чаще всего в нерегулируемом приводе. При плавном регулировании частоты вращения используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором с питанием их от тиристорных преобразователей частоты или двигатели с фазным ротором, а для электроприводов с широким диапазоном регулирования частоты вращения, требующих повышенных пусковых, перегрузочных и тормозных моментов, двигатели постоянного тока, для питания которых все более широко используют тиристорные преобразователи тока.

Таким образом, асинхронные двигатели и двигатели постоянного тока дополняют друг друга, составляя основную массу электродвигателей в народном хозяйстве.

В настоящее время электрические машины общего назначения проектируются и выпускаются в виде серий машин со стройно нарастающими основными параметрами — мощностью и геометрическими размерами. Машины, входящие в серию, характеризуются общностью назначения и условий работы и имеют принципиально подобные конструкции по всей серии или ее участкам. На базе основного исполнения серии — двигателей общего назначения — выпускаются с небольшими изменениями машины специального назначения в виде электрических и конструктивных модификаций. И только в тех случаях, когда требования, предъявляемые к электрическим машинам, значительно отличаются от тех, которым можно удовлетворить в серии двигателей общего назначения, проектируют отдельные специальные машины или серии таких машин, как, например, крановометаллургические, погружные, взрывозащищенные и т. п.

Несмотря на наличие обширной литературы по проектированию электрических машин, предлагаемая вниманию читателей книга имеет свои существенные особенности, учитывающие связь между отдельными типоразмерами машин как основного исполнения серии, так и ее модификаций и ставящие целью всемерное повышение производственной технологичности машин, в особенности в условиях их массового производства.

Важнейшими факторами, которые должны учитываться при проектировании серий, являются соответствие показателей машин современному техническому уровню, надежность, экономичность в производстве и эксплуатации; в ряде случаев разработка этих вопросов должна предшествовать началу проектирования. Проектирование должно проводиться с учетом требований государственных и отраслевых стандартов.

В книге обобщен многолетний опыт работы научно-исследовательских организаций и предприятий электротехнической промышленности по созданию серий электрических машин.

Видная роль в развитии отечественного электромашиностроения и в создании серий электрических машин принадлежит советским ученым М. П. Костенко, К. И. Шенферу, А. Е. Алексееву, Г. Н. Петрову, В. А. Трапезникову, Д. В. Ефремову, А. Г. Иосифьяну, Т. Г. Сорокеру, А. И. Бертинову и др.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензенту книги доктору техн. наук В. И. Радину и доктору техн. наук, проф. Т. Г. Сорокеру за весьма полезные практические замечания и рекомендации, а также инж. Э. П. Клименко за большую работу по редактированию книги.

Все замечания по содержанию книги просим направлять в адрес издательства «Энергия»: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Авторы

Часть первая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕРИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава первая

РАЗВИТИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Наиболее широко применяемыми электрическими машинами являются асинхронные двигатели. Только низковольтные двигатели потребляют более 40% всей электрической энергии, вырабатываемой в нашей стране. Потребность в этих двигателях непрерывно растет. Среднегодовой темп прироста производства асинхронных двигателей составил за девятую пятилетку 8%. В десятой пятилетке выпуск асинхронных двигателей по сравнению с 1975 г. увеличится более чем в 1,3 раза. Это особенно подчеркивает значение асинхронных двигателей для народного хозяйства страны.

Вместе с тем в некоторых областях народного хозяйства электроприводы постоянного тока оказываются значительно эффективнее по производительности и точности, чем переменного тока (вследствие ряда известных преимуществ двигателей постоянного тока) и в ряде областей не могут быть вытеснены и заменены более простыми и дешевыми асинхронными двигателями.

Удельный вес двигателей постоянного тока в общем выпуске электрических машин составляет в среднем 4—5% и не имеет тенденции к снижению вследствие расширяющегося внедрения автоматизированных технологических процессов, а также успехов в развитии тиристорного питания двигателей постоянного тока.

До Великой Октябрьской социалистической революции электродвигатели в нашей стране выпускались в небольших количествах отдельными предприятиями различных акционерных обществ по чертежам зарубежных фирм («Сименс — Шуккерт», АЕГ, АСЕА).

В послереволюционные годы производство электродвигателей было сосредоточено в основном на четырех электромашиностроительных заводах: Ленинградском («Электросила»), Харьковском (ХЭМЗ), Ярославском (ЯЭМЗ) и Баранчинском электромеханическом им. М. И. Калинина — мощность двигателей составляла от 2 до 160 кВт. Эти двигатели, выпускавшиеся по иностранным чертежам почти до конца 20-х годов, имели большое удельное потребление цветного и черного металла и были нетехнологичны. В этот период в стране сильно ощущался недостаток металла; быстрые темпы развития промышленности требовали неуклонного роста выпуска электрических машин, непрерывно возникали новые требования к характеристикам и исполнениям электродвигателей, поэтому советские инженеры-электромашиностроители в середине 20-х годов приступили к созданию отечественных конструкций и серий асинхронных двигателей, а в начале 30-х годов — двигателей постоянного тока, а также к разработке теоретических во-

просов, связанных с проектированием электродвигателей и их исследованием.

Развитие электромашиностроения в 20-х и начале 30-х годов шло, с одной стороны, по пути усовершенствования старых серий (R-4, PRV-4, PRV-6, MT), а с другой стороны — по пути разработки заводами новых серий и их дальнейшей модернизации (А, БАО, БАО-2, И, И2, Т, МТ). Это привело к появлению в Советском Союзе большого многообразия серий электродвигателей, которое начало тормозить дальнейшее техническое развитие, вследствие чего возникла задача создания единых всесоюзных серий электрических машин, имеющих в условиях социалистического хозяйства исключительно важное значение.

Для решения этой проблемы во второй половине 30-х годов были разработаны серии асинхронных двигателей АД мощностью от 1 до 10 кВт, МА-200 — от 10 до 100 кВт, АМ — от 100 до 1000 кВт и серия двухполюсных двигателей АД-3000 мощностью от 16 до 148 кВт. В разработанных сериях была получена большая экономия материалов (например, меди — 25—35%) за счет повышения магнитного потока и форсировки охлаждения машин.

Серии асинхронных двигателей АД, АД-3000, МА-200 и АМ, разрабатывавшиеся как единые всесоюзные, на самом деле этого предназначения не осуществили и были освоены только заводами-разработчиками. По удельному расходу материалов эти серии были прогрессивными и опережали аналогичные серии зарубежных фирм. Однако чрезмерное использование активных материалов привело к уменьшению к. п. д., коэффициента мощности и снижению надежности двигателей, особенно при отсутствии в то время должной тепловой защиты.

Более рациональное использование металла было осуществлено в двигателях серии «Урал» мощностью от 1 до 13 кВт, разработанной к 1943 г. При некотором увеличении расхода материалов трудоемкость изготовления этих двигателей по сравнению с двигателями серии АД сократилась почти в 2 раза за счет высокого уровня унификации сборочных единиц и деталей и удачного решения технологических вопросов.

Многообразные серии асинхронных двигателей, разработанные и освоенные заводами до Великой Отечественной войны и в военные годы, к концу 40-х годов уже не соответствовали требованиям производства и эксплуатации. Двигатели не имели единой шкалы мощностей и единой увязки шкалы мощностей с установочными и присоединительными размерами. Энергетические показатели и металлоемкость машин одинаковой мощности и одной и той же частоты вращения были различны. Отсутствовал необходимый уровень унификации сборочных единиц и деталей, что мешало внедрению прогрессивных технологических процессов. Все это создавало значительные затруднения в производстве, эксплуатации и ремонте двигателей.

Кроме того, существовавшие серии имели очень мало двигателей модифицированных и специальных исполнений, крайне нужных развивающемуся народному хозяйству; не было серий закрытых обдуваемых двигателей общего назначения. Возникла необходимость разработки новых, действительно единых для всей страны серий асинхронных двигателей, которые находились бы на современном техническом уровне, были бы объединены общностью расчета, конструкции и технологии производства, выпуск которых на разных электромашиностроительных заводах выполнялся бы по одним и тем же чертежам (при соответствующей специализации и достижении массовости выпуска) и которые

облегчали бы задачи организаций, проектирующих различные электроустановки, сокращали бы парк резервных электродвигателей и запасных частей к ним у потребителя.

Все эти требования нашли исчерпывающее отражение в первой единой серии асинхронных двигателей А — АО мощностью от 0,6 до 100 кВт, разработанной в 1946—1949 гг. Детально отработанная расчетно-конструкторская и технологическая документация по всем исполнениям двигателей дала возможность в относительно короткий срок, с 1949 по 1951 г., внедрить серию в производство на многих заводах Советского Союза при одновременном проведении специализации предприятий. Единая серия двигателей А — АО заменила восемь разрозненных серий.

В дальнейшем в связи с развитием электропривода возникла необходимость в увеличении числа ступеней шкалы мощностей, появилась потребность в дополнительных модификациях и специальных исполнениях и в улучшении массо-габаритных показателей.

Это привело к необходимости разработки более совершенной второй единой серии асинхронных двигателей А2 — АО2 мощностью от 0,6 до 100 кВт. Эта серия была создана с учетом рекомендаций МЭК по установочным размерам, а также разработанных в то время рекомендаций СЭВ по шкале мощностей и увязке ее с установочными размерами.

Электромагнитные расчеты двигателей серии А2 — АО2 были впервые выполнены на ЭВМ. При этом был применен принципиально новый подход к расчету двигателей с поиском оптимального варианта по минимуму суммы затрат на производство и эксплуатацию. В результате такого расчета к. п. д. двигателей был повышен в среднем на 1,7% по сравнению с к. п. д. двигателей серии А — АО, а масса машин благодаря применению тонкослойной изоляции повышенной нагревостойкости снизилась в среднем на 25%. Изготовление электродвигателей серии А2 — АО2 было предусмотрено на новом автоматизированном технологическом оборудовании.

В области асинхронных двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт в конце 40-х годов была разработана серия высоковольтных двигателей АМСО (а затем ФАМСО и ДАМСО) с непрерывной изоляцией обмотки статора вместо гильзовой, что значительно повысило надежность машин. Однако нужды народного хозяйства потребовали создания единой серии двигателей от 100 до 1000 кВт с максимальной унификацией сборочных единиц, деталей и сортамента материалов. Такая серия была разработана в период 1952—1956 гг. и получила наименование серии А — АК (двигатели с короткозамкнутым и с фазным ротором). В серии была принята твердая шкала мощностей, соответствующая 10-му ряду предпочтительных чисел (ГОСТ 8032-56). Высокий уровень унификации машин данной серии позволил создать высокомеханизированное их производство с применением передовой современной технологии.

К середине 60-х годов серия двигателей А — АК морально устарела: по массо-габаритным показателям она отстала от зарубежных серий на 15—20%, а установочные размеры не соответствовали рекомендациям МЭК.

В 1964—1965 гг. была создана вторая единая серия асинхронных двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт: А2 — АК2 и АО2 — АОК2. В результате применения для корпусной и витковой изоляции улучшенных электроизоляционных материалов с уменьшенной толщиной и повышения класса нагревостойкости на низковольтном участке серии уро-

вень использования активной части двигателей был повышен на 20—25% по сравнению с серией А — АК.

Аналогичные разработки вели все страны — члены СЭВ, выработавшие рекомендации по единой увязке шкалы мощностей с установочными размерами.

К дальнейшим работам по созданию единых серий асинхронных двигателей относится разработка серии Д и Да мощностью от 0,27 до 4 кВт (высоты оси вращения 71—112 мм), соответствующей по увязке шкалы мощностей с установочными размерами стандарту DIN (ФРГ, 1964 г.), серии А3 — АО3 мощностью от 132 до 500 кВт (высоты оси вращения 315—400 мм) и серии 4А.

Разработка серии 4А с высотами оси вращения 50—355 мм базируется на рекомендациях МЭК по шкале мощностей и установочным размерам и на рекомендациях СЭВ по увязке мощностей с установочными размерами. Эта увязка предусматривает повышение мощностей на одну-две ступени шкалы по сравнению с современными стандартами DIN (ФРГ, 1964 г.) и NEMA (США, 1965 г.), а по сравнению с серией А2 — АО2 — на две-три ступени.

Основной задачей проектирования серии 4А явилось создание электродвигателей, не уступающих по массо-габаритным и энергетическим показателям, а также по надежности лучшим зарубежным образцам (с учетом возможного прогресса в проектировании в 1975—1980 гг.).

Повышение мощности двигателей серии 4А при данных высотах оси вращения на две-три ступени шкалы мощностей по сравнению с двигателями серии А2 — АО2 достигнуто за счет применения электротехнической стали с улучшенными магнитными свойствами, реализации запасов по нагреву и усовершенствования охлаждения, перехода на отдельных участках серии на более высокие классы нагревостойкости изоляции. В серии приняты увеличенные наружные диаметры сердечников статора, оптимальные для данных высот оси вращения, что позволило при увеличении объема сердечников сохранить в рациональных пределах отношение их длин к диаметрам.

Разработка низковольтных двигателей серии 4А велась с широким использованием ЭВМ для электромагнитного, теплового и экономического расчетов с поиском оптимальных вариантов.

По сравнению с серией А2—АО2 в серии 4А достигнуты: уменьшение массы двигателей в среднем на 15—18%, экономия обмоточной меди и электротехнической стали на 20—25%. При этом энергетические показатели двигателей остались приблизительно на уровне показателей двигателей серии А2—АО2.

В области двигателей постоянного тока мощностью до 200 кВт до начала 30-х годов выпускалось ограниченное количество типоразмеров несовершенных, даже для того времени, машин старых серий, выполнявшихся по чертежам фирм АЕГ, «Сименс — Шуккерт». Советские электромашиностроители разработали и освоили к 1932 г. первые серии машин постоянного тока: ПН мощностью до 200 кВт и МП550 мощностью свыше 200 кВт. Эти серии обладали меньшей массой и лучшим использованием активных материалов.

Однако по причинам, изложенным выше применительно к асинхронным двигателям, к началу 50-х годов серии ПН и МП550 уже не отвечали требованиям производства и эксплуатации, поэтому в 1954—1956 гг. была разработана первая единая серия машин постоянного тока П с 1-го по 11-й габарит, мощностью от 0,3 до 200 кВт при 1500 об/мин, а затем единая серия машин П 12—17-го габаритов мощностью свыше

200 кВт. Впервые для двигателей постоянного тока была применена твердая шкала мощностей с фиксированными значениями частот вращения. На базе основного исполнения была создана широкая номенклатура различных электрических и конструктивных модификаций с высоким уровнем унификации деталей и сборочных единиц. Двигатели имели улучшенные динамические характеристики, например, момент инерции якоря снизился в сравнении с двигателями серии ПН в среднем на 34%.

Серии машин постоянного тока, как показывает практика, заменяются или коренным образом модернизируются каждые 15—20 лет. Непрерывное развитие техники предъявляет все новые требования к двигателям постоянного тока: увеличение пределов регулирования частоты вращения, улучшение рабочих характеристик, повышение надежности, снижение габаритов и т. п. Возросшие технические требования повлекли за собой создание новой единой серии 2П, которая по своим показателям не уступает наиболее совершенным в современном электромашиностроении образцам.

Высоты оси вращения двигателей серии 2П соответствуют рекомендациям МЭК, а мощности их повышены на одну-две ступени шкалы мощностей по сравнению с двигателями серии П. Масса двигателей серии 2П мощностью до 200 кВт снижена в среднем на 10%, а момент инерции якоря — на 22%. Это обусловлено использованием изоляции более высокого класса нагревостойкости, применением эмалированных проводов на нижнем участке серии (со всыпной обмоткой якоря), повышением эффективности охлаждения, лучшим использованием междуполюсного пространства.

Масса двигателей серии 2П мощностью свыше 200 кВт снижена в среднем на 21%, а момент инерции якоря — на 45%. На этом участке серии применены более нагревостойкая изоляция (класса F вместо класса B) на основе полиимидных и полиамидных материалов, обеспечивающая лучшее заполнение пазов якоря, и электротехническая сталь улучшенных марок. В серии сокращена до минимума номенклатура профилей обмоточной и коллекторной меди, что очень важно для единичного или мелкосерийного производства.

Особое внимание при создании серии 2П было уделено повышению надежности двигателей. Практика проектирования и внедрения серий электродвигателей показывает, что при разработке каждой последующей серии основные показатели технического уровня машин повышаются на определенную ступень.

Наиболее характерными из этих показателей являются масса двигателей и уровень использования активной части, свидетельствующие о достигнутой степени загрузки материалов в машинах при данном рациональном уровне энергетических показателей и при достаточно высоких уровнях показателей надежности и технологичности.

Для сравнения отдельных серий электродвигателей по массе можно воспользоваться выражением

$$G_{дв}=C(P_1/n)^{\theta}, \tag{1-1}$$

где $G_{дв}$ — масса электродвигателя, кг; P_1 — подводимая мощность, кВ·А (для асинхронных двигателей) или кВт (для двигателей постоянного тока); n — частота вращения, об/мин; C — коэффициент пропорциональности; θ — показатель степени.

Если значение показателя степени θ для сравниваемых серий принять неизменным, то коэффициент пропорциональности C может характеризовать данную серию по уровню массы ее электродвигателей.

Исследованиями, проведенными на ряде старых и новых серий электродвигателей отечественных и ряда зарубежных фирм, установлено, что показатель степени ϑ в (1-1) близок к 2/3, поэтому для общего сравнительного анализа серий можно принять:

$$G_{дв}=C\,(P_1/n)^{2/3}. \qquad (1\text{-}2)$$

Сравнение различных серий электродвигателей по уровню электромагнитного использования их активной части при данной синхронной частоте вращения может быть проведено с помощью коэффициента K, входящего в формулы (11-18) или (11-19). С достаточной степенью точности можно в этих формулах принять $\gamma'=0{,}8$ для двигателей со степенью защиты IP23 * и $\gamma'=0{,}45$ для двигателей со степенью защиты IP44 *. Тогда уровень использования активной части двигателей соответствующих серий, относящихся к данной степени защиты и данному числу полюсов или данной частоте вращения, будет характеризоваться коэффициентом K. В формулах (11-18) и (11-19) диаметр $D_ш$, а также длины l'_1 или l'_2 выражены в дециметрах для большего удобства возведения в дробную степень при пользовании логарифмической линейкой.

На рис. 1-1—1-4 представлены зависимости изменения коэффициентов C и K для серий отечественных асинхронных двигателей.

Плавные кривые C и K характеризуют технический уровень, достигнутый в период разработки той или иной серии (период разработки показан на графиках пунктирной линией). Из этих кривых видно, что с начала текущего столетия и примерно до 30-х годов уменьшение массы двигателей мощностью до 100 кВт за каждое десятилетие составляет 19—25%, а повышение уровня использования активной части — в среднем около 28—30%. Аналогично для двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт эти изменения соответственно составляют 12—14% и 28%. Далее степень изменения массы и уровня использования активной части двигателей постепенно уменьшается, и можно ожидать, что к 1980 г. при практически неизменном уровне энергетических показателей двигателей и неизменных свойствах материалов для двигателей мощностью до 100 кВт уменьшение массы и повышение уровня использования активной части могут составить, видимо, всего лишь соответственно 4—7% и 3—4% для двигателей мощностью свыше 100 кВт — соответственно 8—9% и 6—7%.

Такая закономерность развития технического уровня асинхронных двигателей характерна не только для Советского Союза. На рис. 1-1 квадратиками отмечены серии асинхронных двигателей фирмы АЕГ, относящиеся к периоду развития с 1900 до 1954 г. Эти квадратики практически лежат на плавной кривой коэффициента С, построенной по данным серий, выпускаемых в Советском Союзе. Кроме того, на рис. 1-2—1-4 нанесены точки, соответствующие двигателям передовых зарубежных фирм АСЕА, АЕГ, «Сименс-Шуккерт» и АСЕК более поздних лет. Эти точки также практически совпадают с кривыми коэффициента C отечественных серий.

Энергетические показатели — к. п. д. и коэффициент мощности — в начале текущего столетия были сравнительно низкими и только к 1913 г. они повышаются до уровня, близкого к современному. В конце 30-х годов уровень энергетических показателей несколько снижается, а затем с конца 40-х годов снова повышается. Понижение к. п. д. и коэффициента мощности электродвигателей в конце 30-х годов объясняет-

* О стандартных обозначениях степеней защиты см. § 3-1.

ся повышенным использованием активной части машин того времени, о чем было сказано ранее.

Такие характерные для асинхронных двигателей параметры, как кратность максимального момента, кратности начального пускового момента и начального пускового тока для двигателей с короткозамкнутым ротором, существенным изменениям в процессе технического развития двигателей не подвергались и находились примерно на современном уровне.

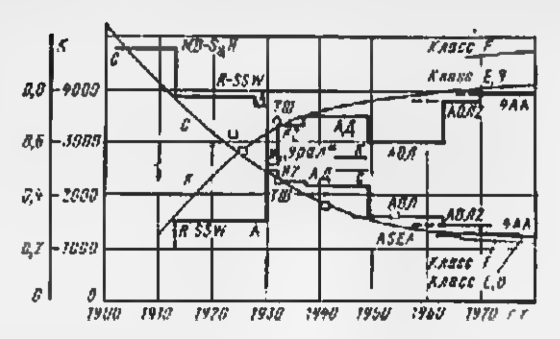


Рис. 1-1. Техническое развитие асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью от 0,5 до 5,5 кВт при $2p=4$.

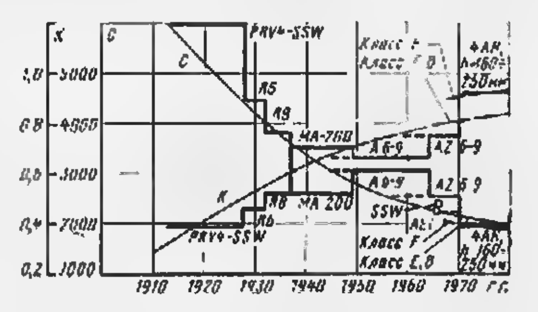


Рис. 1-2. Техническое развитие асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, степенью защиты IP23, мощностью от 10 до 100 кВт при $2p=4$.

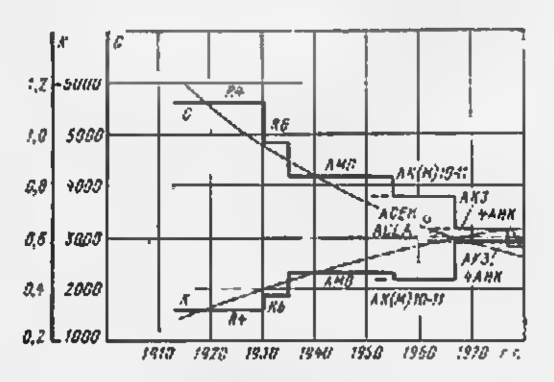


Рис. 1-3. Техническое развитие асинхронных двигателей с фазным ротором, степенью защиты IP23, на напряжение до 660 В, мощностью от 100 до 315 кВт при $2p=6$.

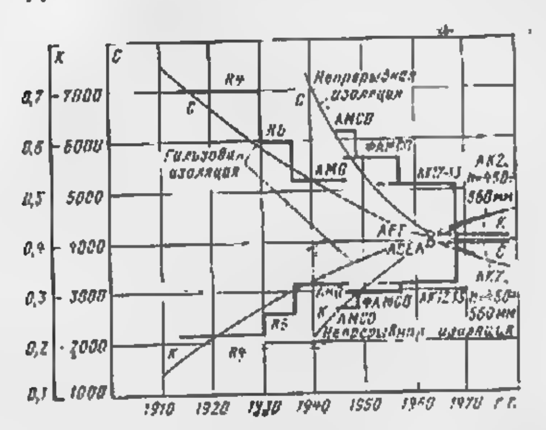
Надежность электродвигателей разработки конца 30-х годов была в известной степени ниже надежности электродвигателей предыдущих лет. Надежность низковольтных двигателей существенно возросла в разработках конца 40-х годов за счет освоения впервые в Советском Союзе асинхронных двигателей общего назначения со степенью защиты IP44 (закрытых обдуваемых) мощностью до 100 кВт, применения в машинах до 100 кВт рациональных электромагнитных нагрузок и ограничения скорости нарастания температуры в обмотках при пуске, а надежность высоковольтных двигателей — за счет внедрения непрерывной корпусной и надежной витковой изоляции и усовершенствования конструкции сварных клеток короткозамкнутых роторов.

В последующие годы надежность электродвигателей была еще более повышена в результате полного отказа от исполнения по степени защиты IP23 (защищенные с внутренней вентиляцией) на участке наиболее массовых машин мощностью до 10 кВт, применения более нагревостойкой изоляции, внедрения заливки алюминием роторов двигателей мощностью от 100 до 400 кВт, механизации и автоматизации производства, а также в результате более широкого развития специальных исполнений для самых разнообразных потребностей народного хозяйства.

Уровень технологичности конструкций асинхронных двигателей, относящихся к сериям начального периода развития, был очень низким. Внедрение серий А — АО, а затем А2 — АО2 с высоким уровнем унификации позволило снизить трудоемкость изготовления в несколько раз.

Дальнейшее существенное уменьшение трудоемкости изготовления электродвигателей достигнуто при освоении серии 4А в результате применения прогрессивных технологических процессов с высокой степенью механизации и автоматизации.

В двигателях отечественных единых серий предусмотрены все необходимые народному хозяйству исполнения по способу монтажа, а также электрические и конструктивные модификации, специальные исполнения по конструкции и по назначению для работы в различных условиях окружающей среды.



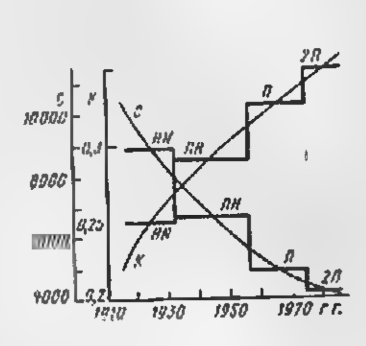


Рис. 1-4. Техническое развитие асинхронных двигателей с фазным ротором, степенью защиты IP23, на напряжение 6000 В, мощностью от 200 до 1000 кВт при $2p=6$.

Рис 1-5. Техническое развитие двигателей постоянного тока со степенью защиты IP22, мощностью от 10 до 200 кВт при 1500 об/мин

Изменение коэффициентов C и K для серий двигателей постоянного тока представлено на рис. 1-5. За период 1917—1956 гг. снижение уровня массы двигателей в среднем за десятилетие составляло 15% (при этом не учитываются годы Великой Отечественной войны и восстановительного периода), за период 1956—1974 гг. — 18%. Если принять, что двигатели серии 2П будут выпускаться без модернизации до 1984 г., то снижение уровня массы за десятилетие составит 10%.

Регулировочные свойства двигателей также непрерывно улучшаются как за счет расширения диапазонов регулирования частоты вращения вверх от номинальной ослаблением поля главных полюсов, так и вниз от номинальной снижением напряжения на якоре при постоянном моменте вращения. Например, двигатель мощностью около 20 кВт с частотой вращения 950—1000 об/мин имел диапазон регулирования частоты вращения ослаблением поля 1 : 1,5 в 1917 г.; 1 : 1,75 в 1932 г.; 1 : 2 в 1956 г.; 1 : 2,5 в 1974 г.

Дальнейшее развитие технического уровня асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока идет в настоящее время главным образом в направлении повышения технологичности конструкции. В области асинхронных двигателей массового производства (высоты оси враще-

ния 50—100 мм) в зарубежной практике внедряются так называемые неразборные конструкции; для средних и больших двигателей все большее развитие получают блочные конструкции. Для двигателей постоянного тока внедряются конструкции, у которых полюсная система, аналогичная сердечнику статора асинхронных двигателей, впрессовывается после укладки обмоток в станину, соответствующую по конструкции станинам асинхронных двигателей.

Глава вторая

ШКАЛЫ МОЩНОСТЕЙ, РЯДЫ УСТАНОВОЧНЫХ РАЗМЕРОВ, ДИАПАЗОНЫ НАПРЯЖЕНИЙ И ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ

2-1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ МОЩНОСТЕЙ И УСТАНОВОЧНЫХ РАЗМЕРОВ

При проектировании современных серий электрических машин особо важную роль играют вопросы стандартизации, в частности стандартизации международной.

Стандартизация в области электрических машин, касающаяся шкалы мощностей, установочных и присоединительных размеров, а также взаимной увязки мощностей с установочными размерами, имеет чрезвычайно важное значение для различных областей народного хозяйства, потребляющих электродвигатели, а также для международной торговли как непосредственно электрическими машинами, так и различного рода оборудованием, в котором они установлены.

До Великой Отечественной войны стандартизация в области машин переменного и постоянного тока ограничивалась только высотами оси вращения и размерами выступающего конца вала. Шкала мощностей не была стандартизована; при переходах от старых серий к новым или при модернизации старых серий она изменялась каждый раз по усмотрению заводов-изготовителей электрических машин.

В серии асинхронных двигателей А — АО мощностью от 0,6 до 100 кВт впервые в СССР (разработка серии относится к 1946—1949 гг.) была принята твердая шкала мощностей для всех частот вращения, строго увязанная с установочными размерами, одинаковыми для обоих исполнений по степени защиты, т. е. IP23 и IP44 *. В области высоковольтных асинхронных двигателей (номинальные напряжения 3000 и 6000 В) твердая шкала мощностей была введена в 1955—1957 гг. при разработке серий АО и А — АК мощностью от 200 до 1000 кВт. Шкала мощностей соответствовала ряду предпочтительных чисел R10 (ГОСТ 8032-56) и включала восемь ступеней мощности.

В серии машин постоянного тока П мощностью от 0,13 до 200 кВт впервые были приняты фиксированные частоты вращения. Шкала мощностей для двигателей защищенного исполнения при частотах вращения 3000—1500 1000 об/мин — твердая; бо́льшая часть двигателей при частотах вращения 750 и 600 об/мин также имеет мощности, совпадающие со значениями мощностей твердой шкалы. Мощности генераторов зани-

* См. § 3-1.

мают промежуточное положение между значениями шкалы мощностей двигателей.

В практике зарубежного электромашиностроения в части шкал мощностей низковольтных и высоковольтных асинхронных двигателей, а также машин постоянного тока наблюдалась картина, аналогичная имевшей место в Советском Союзе, т. е. каждая фирма назначала машинам своей серии любую удобную ей шкалу; в большинстве случаев мощность выражали в лошадиных силах. Известное исключение представляли фирмы США, у которых еще в 30-х годах была твердая шкала мощностей, выраженных в лошадиных силах, построенная не по геометрическому, а по арифметическому ряду (с последними цифрами 0 и 5). Примерно с начала 50-х годов западноевропейские фирмы, в первую очередь фирмы ФРГ — «Сименс», АЕГ, а затем и фирмы других капиталистических стран стали применять близкие по мощностям шкалы, выраженные в киловаттах. Для высоковольтных асинхронных двигателей мощностью свыше 100 кВт вошла в практику шкала по ряду предпочтительных чисел R10.

Первое международное соглашение по нормализации мощностей и установочных размеров было достигнуто в 1957 г. в МЭК. На основе этого соглашения были составлены рекомендации, изложенные в Публикациях 72-1 и 72-2, изданных в 1959 и 1960 гг. Публикация 72-1 относилась к асинхронным двигателям с креплением на лапах и содержала установочные размеры, размеры выступающего конца вала и шкалу мощностей (основную и дополнительную). Публикация 72-2 устанавливала размеры крепительных фланцев.

Указанные публикации МЭК были в начале 70-х годов пересмотрены (в частности, ряды мощностей и установочных размеров расширены и распространены на все электрические машины) и объединены в одну Публикацию 72, изданную в 1971 г., где предусмотрена нормализация шкалы мощностей от 0,06 до 250 кВт (и далее до 1000 кВт по ряду предпочтительных чисел R40), установочных размеров двигателей с высотами оси вращения от 56 до 400 мм включительно для крепления на лапах, фланцев крепительных с диаметром окружности расположения центров отверстий под болты от 55 до 1080 мм, выступающих концов валов диаметром от 7 до 110 мм.

Разработанные в СССР государственные стандарты на шкалу мощностей (ГОСТ 12139-74), высоты оси вращения (ГОСТ 13267-73), установочные и присоединительные размеры (ГОСТ 12126-71, ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 20839-75) базируются на рекомендациях вышеуказанных публикаций МЭК. Основные данные этих стандартов, необходимые для проектирования электрических машин, приведены в приложениях 2—4.

В приложение 3 введены принятые в публикациях МЭК условные обозначения длин корпусов (по расстоянию между осями отверстий под крепежные болты в лапах) двигателей с одинаковыми высотами оси вращения: S — малая длина, M — средняя длина, L — большая длина.

Шкала мощностей и установочные размеры электрических машин нормализованы в МЭК отдельно, рекомендации МЭК по их взаимной увязке отсутствуют. Это приводит к тому, что связь шкалы мощностей с установочными размерами в каждой стране, а в отдельных случаях каждой электромашиностроительной фирмой может осуществляться по-своему.

Первое международное соглашение по увязке мощностей с установочными размерами для асинхронных двигателей общего назначения мощностью до 100 кВт было достигнуто в 1958 г. между странами —

членами СЭВ. Этот документ лег в основу при разработке второй единой серии двигателей А2—АО2 мощностью от 0,6 до 100 кВт.

В 1968 г. страны — члены СЭВ согласовали также увязку мощностей с установочными размерами для разработки унифицированных серий низковольтных асинхронных двигателей мощностью от 100 до 500 кВт и высоковольтных двигателей (на номинальное напряжение 6000 В) от 200 до 1000 кВт. Эта увязка отражена в ГОСТ 7830-68 и ГОСТ 9435-70 и легла в основу при разработке единых серий двигателей АО2, А2—АК2, а затем и серия низковольтных двигателей АО3, А3 — АК3 (табл. 2-1, 2-2).

В середине 60-х годов страны Западной Европы организовали Европейский комитет по координации электротехнических стандартов (CENEL), в который вошли 14 стран (Австрия, Бельгия, Великобритания, Голландия, Дания, Италия, Люксембург, Норвегия, Португалия, Финляндия, Франция, ФРГ, Швейцария и Швеция). Этот комитет принял увязку мощностей асинхронных двигателей общего применения с установочными размерами в соответствии с западногерманским стандартом DIN (ФРГ, 1964 г.). Электродвигатели, выполняемые по увязке CENEL, имеют мощность примерно на одну ступень выше, чем двигатели серии А2 — АО2, соответствующие первоначальной увязке СЭВ (табл. 2-3).

Стандарт США NEMA, после очередного пересмотра в 1965 г., стал близок по увязке мощностей с установочными размерами к стандарту CENEL — DIN (табл. 2-3).

В 1968 г. страны — члены СЭВ согласовали новую увязку мощностей с установочными размерами (табл. 2-4 и 2-5), соответствующую в настоящее время наиболее высокому мировому уровню. Эта увязка относится к асинхронным двигателям общего применения с высотами оси вращения от 56 до 355 мм включительно, на номинальные напряжения до 660 В, в диапазоне мощностей от 0,12 до 400 кВт (по отношению к четырехполюсному исполнению). По этой увязке двигатели с одной и той же высотой оси вращения имеют мощность на одну-две ступени выше, чем по стандарту CENEL — DIN (табл. 2-3).

Указанная увязка мощностей с установочными размерами послужила основой разработки в странах — членах СЭВ новых серий низковольтных асинхронных двигателей, в частности в Советском Союзе серии 4А. Все положительные стороны такой унификации для стран — членов СЭВ при учете необходимой специализации и интеграции производства очевидны. Еще более важное значение при разработке перспективных унифицированных серий будет иметь решение вопроса о создании единой технической документации.

Что касается торгового обмена с капиталистическими странами, где изготовление электрических машин базируется на увязке мощностей с установочными размерами по стандартам DIN и CENEL, то этот вопрос решается в странах — членах СЭВ путем создания специальной модификации основного исполнения машин, рассчитанной на полное соответствие вышеуказанным стандартам (см. гл. 6). У двигателей этой модификации полностью сохраняется активная часть, изменяются (увеличиваются) лишь установочные и присоединительные размеры.

Стандартизованные в МЭК ряды мощностей и высот оси вращения (Публикация МЭК 72) не обладают взаимным соответствием по количеству ступеней и по коэффициентам нарастания между ступенями, особенно для машин мощностью до 100 кВт. Это несоответствие распространяется, конечно, и на наружные диаметры сердечника статора, на-

Таблица 2-1

Увязка мощностей с установочными размерами для низковольтных асинхронных двигателей мощностью свыше 100 кВт (серия АО3, А3—АК3)

Высота оси вращения h, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт												Установочные и присоединительные размеры**, мм					
		Степень защиты IP23*						Степень защиты IP44*											
		Ротор короткозамкнутый	Ротор короткозамкнутый и фазный					Ротор короткозамкнутый											
		$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=10$	$2p=12$	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=10$	$2p=12$	b_{10}	l_{10}	l_{31}	d_{10}	d_1	l_1
315	S	160	132; 160	110	90	55	45	132	132	90	75	45	37	508	406	216	28	80	170
	M	200	200	132	110	75	55	160	160	110	90	55	45	508	457	216	28	80	170
355	S	250	250	160	132	90	75	200	200	132	110	75	55	610	500	254	28	90	170
	M	315	315	200	160	110	90	250	250	160	132	90	75	610	560	254	28	90	170
400	S	400	400	250	200	132	110	315	315	200	160	110	90	686	560	280	35	100	210
	M	500	500	315	250	160	132	400	400	250	200	132	110	686	630	280	35	100	210

* См. § 3-1   ** См. рисунок в приложении 3.

Таблица 2-2

Увязка мощностей с установочными размерами для высоковольтных асинхронных двигателей (6000 В)

Высота оси вращения h, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт										Установочные и присоединительные размеры**, мм					
		Степень защиты IP23*					Степень защиты IP44*										
		Ротор короткозамкнутый и фазный					Ротор короткозамкнутый и фазный										
		$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=10$	$2p=12$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=10$	$2p=12$	b_{10}	l_{10}	l_{31}	d_{10}	d_1	l_1
400	S	200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	680	560	280	35	90	170
	M	250	200	—	—	—	—	—	—	—	—	680	630	280	35	90	170
	L	315	250	200	—	—	—	—	—	—	—	680	710	280	35	90	170
450	S	400	315	250	200	—	—	—	—	—	—	750	630	315	35	100	210
	M	500	400	315	250	—	200	—	—	—	—	750	710	315	35	100	210
	L	—	—	—	—	—	250	200	—	—	—	750	800	315	35	100	210
500	S	630	500	400	315	200; 250	—	—	—	—	—	850	710	335	35	110	210
	M	800	630	500	400	315	315	250	200	—	—	850	800	335	35	110	210
	L	—	—	—	—	—	400	315	250	200	—	850	900	335	35	110	210
560	S	1000	800	630	500	400	—	—	—	—	—	950	800	355	42	120	210
	M	1250	1000	800	630	500	500	400	315	250	200	950	900	335	42	120	210
	L	—	—	—	—	—	630	500	400	315	250	950	1000	365	42	120	210
630	S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1030	900	375	42	120	210
	M	—	—	—	—	—	800	630	500	400	315	1030	1000	375	42	120	210
	L	—	—	—	—	—	1000	800	630	500	400	1030	1120	375	42	120	210

* См. § 3-1.   ** См. рисунок в приложении 3.

Таблица 2-3

Увязка мощностей четырехполюсных асинхронных двигателей с установочными размерами по рекомендациям СЭВ и стандартам CENEL—DIN и NEMA

Высота оси вращения *h*, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт							
		Степень защиты IP44*				Степень защиты IP23*			
		СЭВ 1958 (АО2)	DIN 1964 (ФРГ), CENEL	NEMA 1963 (США)	СЭВ 1968 (4А)	СЭВ 1968 (А2)	DIN 1964 (ФРГ), CENEL	NEMA 1963 (США)	СЭВ 1968 (4А)
56	—	—	0,06; 0,09	—	0,12; 0,18	—	—	—	—
63	—	—	0,12; 0,18	—	0,25; 0,37	—	—	—	—
71	—	—	0,25; 0,37	—	0,55; 0,75	—	—	—	—
80	—	—	0,55; 0,75	—	1,1; 1,5	—	—	—	—
90	S	0,6	1,1	0,75	—	—	—	0,75	—
	L	0,8	1,5	1,1; 1,5	2,2	—	—	1,1; 1,5	—
100	S	1,1	—	—	3,0	—	—	—	—
	L	1,5	2,2; 3,0	—	4,0	—	—	—	—
112	S	2,2	—	2,2	—	—	—	2,2	—
	M	3,0	4,0	3,7	5,5	—	—	3,7	—
	L	—	—	—	—	—	—	—	—
132	S	4,0	5,5	5,5	7,5	—	—	5,5	—
	M	5,5	7,5	7,5	11	—	—	7,5	—
	L	—	—	—	—	—	—	—	—
160	S	7,5	—	—	15	—	—	—	18,5
	M	10	11	11	18,5	—	11	11	22
	L	—	15	15	—	—	15; 18,5	15	—
180	S	13	—	—	22	13	—	—	30
	M	17	18,5	18,5	30	17	22	18,5	37
	L	—	22	22	—	—	30	22	—
200	S	22	—	—	—	22	—	—	—
	M	30	—	30	37	30	37	30	45
	L	—	30	37	45	—	45	37	55
225	S	—	37	45	—	—	—	45	—
	M	—	45	55	55	—	55	55	75
	L	—	—	—	—	—	—	—	—
250	S	40	—	—	75	40	75	75	90
	M	55	55	75	90	55	90	90	110
	L	—	—	—	—	—	—	—	—
280	S	75	75	90	110	75	110	110	132
	M	100	90	110	132	100	132	150	160
	L	—	—	—	—	—	—	—	—
315	S	—	—	—	160	—	—	—	200
	M	—	—	—	200	—	—	—	250
	L	—	—	—	—	—	—	—	—
355	S	—	—	—	250	—	—	—	315
	M	—	—	—	315	—	—	—	400
	L	—	—	—	—	—	—	—	—

* См. § 3-1.

Таблица 2-4

Увязка мощностей с установочными размерами для низковольтных асинхронных двигателей (серия 4А)

Высота оси вращения h, мм	Обозначение длины	Мощность двигателей со степенью защиты IP44*, кВт, при $2p$						Размеры выступающего конца вала $d_1 \times l_1$, мм		Тип фланца	
		2	4	6	8	10	12	$2p=2$	$2p=4\div12$	с резьбой	без резьбы
56	—	0,18 0,25	0,12 0,18	—	—	— —	— —	11×23		F65 F85	F115
63	—	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25	— —	— —	— —	14×30		F75 F100	F130
71	—	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55	0,25 —	— —	— —	19×40		F85 F115	F165
80	—	1,5 2,2	1,1 1,5	0,75 1,1	0,37 0,55	—	—	22×50		F100 F130	F165
90	L	3,0	2,2	1,5	0,75 1,1	—	—	24×50		F115 F130	F215
100	S L	4,0 5,5	3,0 4,0	— 2,2	— 1,5	— —	— —	28×60		F130 F165	F215
112	M	7,5	5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	—	—	32×80		—	F265
132	S M	— 11	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	— —	— —	38×80		—	F300
160	S M	15 18,5	15 18,5	11 15	7,5 11	— —	— —	42×110	48×110	—	F300
180	S M	22 30	22 30	— 18,5	— 15	— —	— —	48×110	55×110		F350
200	M L	37 45	37 45	22 30	18,5 22	— —	— —	55×110	60×140	—	F400
225	M	55	55	37	30	—	—	55×110	65×140	—	F500
250	S M	75 90	75 90	45 55	37 45	— —	— —	65×140	75×140	—	F500
280	S M	110 132	110 132	75 90	55 75	— —	— —	70×140	80×170	—	F600
315	S M	160 200	160 200	110 132	90 110	55 75	45 55	75×140	90×170	—	F600
355	S M	250 315	250 315	160 200	132 160	90 110	75 90	85×170	100×210	—	F740

* См. § 3-1.

Примечание. Размеры фланцев и их привязка к высотам оси вращения — по ГОСТ 18709-73.

ходящиеся в определенной зависимости от высот оси вращения (см. § 11-1). Ряды мощностей и высот оси вращения неравномерны: значение коэффициента нарастания мощности колеблется от 1,19 до 1,50, а коэффициента нарастания высот оси вращения — от 1,111 до 1,212. Результатом этих недостатков является непостоянство числа длин сердечника, приходящихся на диаметр, и очень неравномерное распределение по серии отношений длины сердечника к его наружному диаметру. Например, в рекомендуемой СЭВ увязке мощностей с установочными размерами (табл 2-4 и 2-5) в высотах оси вращения 90, 112 и 225 мм при-

Таблица 2-5

Увязка мощностей с установочными размерами для низковольтных асинхронных двигателей (серия 4А)

Высота оси вращения h, мм	Обозначение длины	Мощность двигателей со степенью защиты IP23*, кВт, при 2 p						Размеры выступающего конца вала $d_1 \times l_1$, мм		Тип фланца (без резьбы)
		2	4	6	8	10	12	2 p = 2	2 p = 4÷12	
160	S M	22 30	18,5 22	11 15	7,5 11	— —	— —	42×110	48×110	F350
180	S M	37 45	30 37	18,5 22	15 18,5	— —	— —	48×110	55×110	F400
200	M L	55 75	45 55	30 37	22 30	— —	— —	55×110	60×140	F400
225	M	90	75	45	37	—	—	56×110	65×140	F500
250	S M	110 132	90 110	55 75	45 55	— —	— —	65×140	75×140	F500
280	S M	160 200	132 160	90 110	75 90	— —	— —	70×140	80×170	F600
315	S M	— 250	200 250	132 160	110 132	75 90	55 75	75×140	90×170	F600
355	S M	315 400	315 400	200 250	160 200	110 132	90 110	85×170	100×210	F740

* См. § 3-1.

Примечание. Размеры фланцев и их привязка к высотам оси вращения — по ГОСТ 18709-73.

Таблица 2-6

Увязка мощностей с установочными размерами для двигателей постоянного тока со степенью защиты IP22* и способом охлаждения IC01**

Высота оси вращения h, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт, при n, об/мин						Размеры выступающего конца вала $d_1 \times l_1$, мм
		3000	2200	1500	1000	750	600	
80	—	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55	0,18 0,25	0,12 0,18	0,09 0,12	14×30
90	M L	— 1,5	— 1,1	— 0,75	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25	16×40
100	M L	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5	— 0,75	— 0,55	— 0,37	22×60
112	M L	4,0 5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	1,1 1,5	0,75 1,1	0,55 0,75	24×60
132	M L	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5	38×80
160	S M L	15 18,5 22	11 15 18,5	7,5 11 —	4,0 5,5 7,5	3,0 4,0 5,5	2,2 3,0 4,0	38×80
180	M L	30 37	22 30	15 18,5	— 11	— 7,5	— 5,5	42×110
200	M L	45 55	37 45	22 30	15 18,5	— 11	— 7,5	48×110
225	S M L	— 75 90	— 55 75	— 37 45	— 22 30	15 18,5 22	11 15 18,5	55×110

Высота оси вращения *h*, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт, при *n*, об/мин						Размеры выступающего конца вала $d_1 \times l_1$, мм
		3000	2200	1500	1000	750	600	
250	M L	— —	90 110	55 75	37 45	30 37	22 30	65×140
280	M L	— —	132 160	90 110	55 75	45 55	— 37	70×140
315	S M L	— — —	— — —	132 160 200	— 90 110	— — 75	— 45 55	80×170

* См. § 3-1. ** См. § 3-2.

Таблица 2-7

Увязка мощностей с установочными размерами для двигателей постоянного тока со степенью защиты IP44* и способами охлаждения IC0041 и IC0141****

Высота оси вращения *h*, мм	Обозначение длины	IC0141					IC0041				
		Мощность, кВт, при *n*, об/мин					Мощность, кВт, при *n*, об/мин				
		3000	2200	1500	1000	750	3000	2200	1500	1000	750
80	—	0,55 0,75	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25	0,12 0,18	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25	0,12 0,18	0,09 0,12
90	M L	1,1 1,5	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55	0,25 0,37	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25
112	M L	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5	0,75 1,1	0,55 0,75	1,5 2,2	1,1 1,5	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55
132	M L	4,0 5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5	3,0 4,0	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5	0,75 1,1
160	M L	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	5,5 7,5	1,0 5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	1,5 2,2
180	M L	15 18,5	11 15	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	11 15	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	3,0 4,0
200	M L	22 30	18,5 22	— 15	— 11	— 7,5	— 18,5	— 15	— 11	— 7,5	— 5,5

* См. § 3-1. ** См. § 3-2.

Таблица 2-8

Увязка мощностей с установочными размерами для двигателей постоянного тока со степенями защиты IP22* и IP44* и способами охлаждения IC17 и IC37** (соответственно)**

Высота вращения *h*, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт, при *n*, об/мин					
		1000	750	600	500	400	300
355	M L	200 250	160 200	132 160	110 132	90 110	75 90
400	M L	320 —	250 —	200 —	160 —	132 —	110 —
450	M L	400 500	320 400	250 320	200 250	160 200	132 160
500	S M L	630 800 1000	500 630 800	400 500 630	320 400 500	250 320 400	200 250 320

* См. § 3-1. ** См. § 3-2.

нито всего по одной длине сердечника и соответственно по одной длине корпуса вместо двух. Эти обстоятельства отрицательно сказываются на габаритных размерах и характеристиках машин серии, а также на их производственной технологичности.

Для устранения этих недостатков в МЭК ведется работа по коренному пересмотру Публикации 72. Окончательное урегулирование несоответствий и начало внедрения новых рекомендаций в промышленность намечено осуществить в 1980 г.

На рекомендациях МЭК по высотам оси вращения, установочным размерам и шкале мощностей, нашедших свое отражение в ГОСТ 20529-75, базируется также и разработанная новая серия двигателей постоянного тока 2П мощностью до 200 кВт.

Современный средний уровень увязки мощностей с установочными размерами для двигателей постоянного тока при разных частотах вращения приведен в табл. 2-6—2-8.

2-2. ДИАПАЗОНЫ НАПРЯЖЕНИЙ, МОЩНОСТЕЙ И ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ СЕРИЯХ

Номинальные напряжения питающих сетей переменного и постоянного тока до 1000 В устанавливаются ГОСТ 21128-75, а сетей переменного тока свыше 1000 В — ГОСТ 721-74.

По номинальному напряжению асинхронные двигатели подразделяются на двигатели низкого (условный термин «низковольтные») и высокого (условный термин «высоковольтные») напряжения. Все двигатели постоянного тока общего назначения относятся к двигателям низкого напряжения.

Асинхронные двигатели низкого напряжения предназначены для подключения к питающей сети с номинальным напряжением 220, 380 или 660 В.

Двигатели высокого напряжения рассчитаны на питание от сети с номинальным напряжением 6000 или 10 000 В

Двигатели постоянного тока предназначены для питания от сети с номинальным напряжением 110, 220, 340 (при питании от тиристорных установок) и 440 В. Для двигателей мощностью 400 кВт и выше применяют также напряжения 600 и 750 В.

Асинхронные двигатели общего назначения низкого напряжения мощностью от 15 кВт и выше должны изготовляться с шестью выводными концами обмотки статора. Схема соединения обмотки — треугольник — звезда. Двигатели мощностью до 11 кВт должны изготовляться с тремя выводными концами. Схема соединения обмотки треугольник или звезда.

Асинхронные двигатели высокого напряжения обычно имеют соединение фаз обмотки статора звездой с выведенными во вводное устройство шестью концами, три из которых образуют нулевую точку на специально предусмотренном для этого зажимном болте. Это позволяет при ревизиях машин разъединять фазы обмотки для выполнения различных измерений.

В результате многолетней практики применения асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока для различных отраслей народного хозяйства, а также при учете современных тенденций технического развития установились определенные диапазоны мощностей, для которых наиболее целесообразными и экономически обоснованными являют-

ся следующие номинальные напряжения питающих электрических сетей для низковольтных асинхронных двигателей

Номинальное напряжение, В	220 и 380	220, 380 и 660	220/380, 380/660	380/660
Мощность, кВт	0,06—0,37	0,55—11	15—110	132—400

для двигателей постоянного тока

Номинальное напряжение, В	110	220	440	600	750
Мощность, кВт	0,12—55	0,12—315	22—800	400—1000	500—1000

Для асинхронных двигателей на номинальное напряжение 6000 В практикой электромашиностроения установлен нижний предел мощности 200 кВт и 630 кВт на номинальное напряжение 10 000 В.

Шкалы номинальных частот вращения серий двигателей постоянного тока с высотами оси вращения до 315 мм базируются на синхронных частотах вращения двигателей переменного тока при частоте сети 50 Гц: 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 об/мин. Кроме того, введена частота вращения 2200 об/мин для уменьшения разрыва между частотами 3000 и 1500 об/мин.

Серии двигателей постоянного тока с высотами оси вращения до 355 мм и низкой частотой вращения обычно выполняют с частотой вращения 400, 300, 200, 150, 100 об/мин или с частотами вращения, подчиняющимися ряду предпочтительных чисел R10: 400, 315, 250, 200, 160, 125, 100 об/мин.

Глава третья

ИСПОЛНЕНИЯ ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ, СПОСОБАМ ОХЛАЖДЕНИЯ И МОНТАЖА

3-1. ИСПОЛНЕНИЯ ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ

Под понятием защиты электрических машин здесь и в дальнейшем подразумевается защита обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машин, и защита машин от попадания внутрь твердых посторонних тел и воды.

Исполнения электрических машин по степени защиты установлены ГОСТ 17494-72, базирующимся на материалах Публикации 34-5 МЭК (издание 1968 г.). По ГОСТ 14254-69 буквенно-цифровое обозначение исполнений состоит из латинских букв IP (начальные буквы английских слов International Protection) и двух цифр. Первая из этих цифр характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машины, а также степень защиты самой машины от попадания в нее твердых посторонних тел. Вторая цифра характеризует степень защиты от проникновения воды внутрь машины.

Многолетняя практика разработки, выпуска и эксплуатации электродвигателей единых серий общего применения показала, что для такого ряда машин вполне достаточным является применение двух степеней защиты: IP23 (или IP22 для двигателей постоянного тока) и IP44. Первая из них характеризует машины в так называемом защищенном исполнении, вторая — в закрытом.

Исполнение машины по степени защиты IP23 соответствует по первой характеристической цифре — защите от возможности соприкосновения пальцев человека с токоведущими или движущимися частями внутри машины и защите от попадания внутрь твердых посторонних тел диаметром не менее 12,5 мм; по второй цифре — защита от дождя, падающего на машину под углом не более 60° к вертикали, а для степени защиты IP22 — от капель воды, падающих под углом не более 15° к вертикали.

Исполнение машины по степени защиты IP44 соответствует по первой характеристической цифре — защите от соприкосновения инструмента, проволоки и других подобных предметов, толщина которых превышает 1 мм, с токоведущими частями внутри оболочки; защите оборудования от попадания мелких твердых посторонних тел толщиной не менее 1 мм; по второй цифре — защите от водяных брызг любого направления. При этом кожух наружного вентилятора должен обеспечивать степень защиты не менее IP20 на входе воздуха и защиту от соприкосновения пальцев с вращающимся вентилятором и попадания твердых посторонних тел диаметром более 50 мм — на выходе; при наличии продуваемого ротора степень защиты отверстий для прохода воздуха через ротор должна быть не менее IP23.

Асинхронные двигатели с высотами оси вращения до 132 мм целесообразно выполнять только со степенью защиты IP44, так как эти машины со степенью защиты IP23 при незначительном преимуществе в использовании материалов имеют более низкие показатели надежности.

Асинхронные двигатели с высотами оси вращения свыше 132 мм предпочтительно иметь двух исполнений по степени защиты (IP23 и IP44). Двигатели с высотами оси вращения свыше 355 мм могут иметь исполнение по степени защиты IP22.

У двигателей постоянного тока всех высот оси вращения целесообразно предусматривать два исполнения по степени защиты IP22 и IP44.

3-2. СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Две наиболее широко применяемые в настоящее время степени защиты электрических машин IP23 (или IP22) и IP44 связаны определенным образом с системами вентиляции и способами охлаждения.

Степень защиты IP23 (или IP22) предопределяет непосредственное охлаждение внутренних частей машины воздухом, поступающим либо из окружающей среды, либо из другого источника через подводящую трубу или подводящий канал (при независимой вентиляции).

В зависимости от направления воздуха внутри машины различают две основные системы вентиляции — аксиальную и радиальную.

В процессе разработки отечественных серий асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 неоднократно проводилось экспериментальное сравнение обеих систем вентиляции — аксиальной и радиаль-

ной — на опытных образцах двигателей различных конструкций при различных номинальных частотах вращения. Результаты сравнения неизменно свидетельствовали о преимуществах радиальной системы по сравнению с аксиальной по интенсивности теплосъема, особенно при синхронных частотах вращения 750 об/мин и ниже, уровню шума, вентиляционным потерям, технологичности конструкции двигателей; поэтому и для будущих перспективных серий радиальная система вентиляции явится наиболее рациональной.

Для двигателей постоянного тока ввиду особенности их конструкции наиболее рациональна аксиальная система вентиляции. В ряде случаев применяется аксиально-радиальная система, при которой дополнительно к аксиальному прохождению охлаждающего воздуха через машину добавляется прохождение его в радиальном направлении через радиальные вентиляционные каналы якоря (при длинах сердечников более 350 мм).

Степень защиты IP44 для машин с самовентиляцией предопределяет применение наружного обдува корпуса вентилятором, насаженным на конец вала, противоположный выступающему концу, и закрытым кожухом, направляющим воздух вдоль ребер или гладкой поверхности станины.

У асинхронных двигателей мощностью от 100 до 400 кВт применяется иногда дополнительное охлаждение ротора наружным воздухом, проходящим через аксиальные вентиляционные каналы.

У высоковольтных асинхронных двигателей мощностью от 400 до 1000 кВт вместо ребристой станины применяется станина с вваренными в нее по всей внешней поверхности стальными трубами, сквозь которые проходит воздух, нагнетаемый наружным вентилятором: воздух внутри двигателя циркулирует под действием внутреннего вентилятора, омывает активные части машины и отдает тепло охлаждаемым внешним воздухом трубам.

В ряде конструкций асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока со степенью защиты IP44 применяется сосредоточенный воздухо-воздушный охладитель. Для относительно небольших двигателей постоянного тока может быть использовано естественное охлаждение. В двигателях постоянного тока с широким диапазоном регулирования частоты вращения, особенно вниз от номинальной, применяется независимая вентиляция с подводом охлаждающего воздуха по трубе и отводом его в окружающую среду (степень защиты двигателя IP22) или подводом и отводом воздуха по трубам (степень защиты IP44). Может также применяться охлаждение при помощи пристроенного вентилятора с независимым приводным двигателем. Такой способ охлаждения относится к двигателям со степенью защиты как IP22, так и IP44. При исполнении со степенью защиты IP22 двигатель-вентилятор располагают либо наверху, либо по оси охлаждаемого двигателя, а при степени защиты IP44 с наружным обдувом — по оси охлаждаемого двигателя.

В 1969 г. МЭК выпущена Публикация 34-6 (устанавливающая условное буквенно-цифровое обозначение способов охлаждения электрических машин), рекомендации которой нашли отражение в ГОСТ 20459-75.

Обозначение способов охлаждения электрических машин состоит из латинских букв IC (начальные буквы английских слов International Cooling) и следующей за ними характеристики цепи охлаждения. Эта характеристика состоит в свою очередь из прописной буквы, обозна-

чающей вид хладагента (воздух — А, водород — Н, вода — W и т. д.), и следующих за ней двух цифр. Первая цифра условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая — способ перемещения хладагента. Если хладагентом в машине является только воздух, то буква, обозначающая вид хладагента, опускается. Если машина имеет две или более цепи охлаждения, то в обозначении указываются цифровые характеристики всех цепей охлаждения, начиная с характеристики цепи с вторичным хладагентом (с более низкой температурой), поэтому для машин с воздушным охлаждением после букв IC могут в обозначении следовать четыре цифры, две из которых (например, для закрытых машин) предназначены для характеристики внешней цепи охлаждения и две — внутренней цепи. Ниже приведены примеры обозначений наиболее употребительных способов охлаждения, а в табл. 3-1 — рекомендуемые области их применения.

Таблица 3-1

Рекомендуемые способы охлаждения в зависимости от высоты оси вращения двигателей и исполнения по степени защиты

Род двигателя	Исполнение по степени защиты	Высота оси вращения h, мм	Способ охлаждения
Асинхронные двигатели	IP23 IP44 IP44	160—560 50—355 400—630	IC01 IC0141 IC0151
Двигатели постоянного тока	IP22 IP22 IP44 IP44 IP44	80—315 355—560 80—200 132—200 225—500	IC01 IC17 IC0041 IC0141 IC37

Примечание. Для поддержания постоянного момента при регулировании частоты вращения вниз от номинальной в двигателях с высотами оси вращения 132—315 мм могут дополнительно применяться способы охлаждения IC17, IC05 при IP22 и IC37, IC0041 при IP44.

IC01 — защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины.

IC05 — защищенная машина, охлаждаемая с помощью встроенного вентилятора, приводимого в движение электродвигателем, питаемым независимо от охлаждаемой машины.

IC17 — защищенная машина с подводящей трубой или подводящим каналом; машина охлаждается вентилятором с приводным электродвигателем, не установленным на машине.

IC26 — защищенная машина с охлаждением при помощи пристроенного вентилятора с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины; воздух из машины поступает в отводящую трубу.

IC37 — закрытая машина с подводящей и отводящей трубами; машина охлаждается вентилятором с приводным электродвигателем, не установленным на машине.

IC0041 — закрытая машина с естественным охлаждением.

IC0141 — закрытая машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на валу машины.

IC0151 — закрытая машина, имеющая корпус с трубами для прохода воздуха, с наружным и внутренним вентиляторами.

IC0541 — закрытая машина, обдуваемая наружным вентилятором, который приводится в движение электродвигателем, питаемым независимо от охлаждаемой машины.

3-3. ИСПОЛНЕНИЯ ПО СПОСОБУ МОНТАЖА

Формы исполнений двигателей общего назначения по способу монтажа и их условное обозначение установлены ГОСТ 2479-65. Буква и первые две цифры характеризуют вид машины (табл. 3-2).

Третья цифра, добавляемая к обозначению вида машины, указывает на ее исполнение по способу монтажа. Примером составления условных обозначений исполнений по способу монтажа машин одного вида (M10) может служить табл. 3-3.

Для обозначения формы выступающих концов вала и их числа (один или два) к показанным выше буквенно-цифровым обозначениям добавляются соответствующие буквы, приведенные в ГОСТ 2479-65, например M101K — исполнение на лапах с двумя подшипниковыми щитами; крепление горизонтальное лапами вниз; с одним концом вала; форма конца вала коническая; при одном выступающем конце вала цилиндрической формы буквы в обозначении не указываются.

В единых сериях электрических машин общего применения использование тех или иных форм исполнения по способу монтажа зависит от размеров машины, ее принципиальной конструкции, степени защиты, высоты оси вращения и т. д. (табл. 3-4).

Связь монтажных исполнений машин с диапазонами высот оси вращения в отечественных сериях примерно соответствует современному зарубежному опыту.

Таблица 3-2

Наиболее широко применяемые виды электрических машин

Обозначение	Вид машины
M10	На лапах с двумя подшипниковыми щитами
M20	На лапах с большим фланцем со стороны выступающего конца вала
M21	На лапах с малым фланцем со стороны выступающего конца вала
M30	Без лап с большим фланцем со стороны выступающего конца вала
M36	Без лап с малым фланцем со стороны выступающего конца вала

Таблица 3-3

Исполнения электрических машин по способу монтажа для вида M10

Обозначение	Исполнение машины
M100	Для установки в любом положении
M101	Для обычной установки с горизонтальным валом, лапами вниз
M102	Для крепления лапами к вертикальной поверхности, концом вала вниз
M103	То же концом вала вверх
M104	Для крепления лапами к потолку
M105	Для крепления лапами к вертикальной поверхности, с горизонтальным положением вала, концом вала вправо
M106	То же концом вала влево

Все формы исполнения машин по способу монтажа легко осуществляются в сериях на базе основного исполнения (М101) путем соответствующего комбинирования обычных и фланцевых подшипниковых щитов со станиной на лапах или без лап.

В 1972 г. МЭК была издана Публикация 34-7, содержащая два кода условных обозначений форм исполнений машин: код I, базирующийся на стандарте DIN42950, и код II, соответствующий по принципу построений условных обозначений стандарту ГОСТ 2479-65. Однако рекомендации Публикации 34-7 отличаются от указанного ГОСТ числом групп машин (девять вместо восьми), их расположением и содержанием, расстановкой материала в таблицах, относящихся к группам, и условными обозначениями концов вала (цифры вместо букв). Перед цифровыми обозначениями исполнений рекомендованы буквы IM (начальные буквы английских слов International Mounting).

Таблица 3-4

Диапазон высот оси вращения электродвигателей современных серий для наиболее распространенных форм исполнения по способу монтажа

Исполнение по способу монтажа	Диапазон высот оси вращения, мм		
	Асинхронные двигатели в исполнении по степени защиты IP44	Машины постоянного тока в исполнении по степени защиты	
		IP22	IP44
М100	50—250	—	—
М101*	280—630	90—500	90—500
М102, М103	—	90—315	90—200
М200	50—250	—	—
М201	280—355	225—250	—
М202, М204	—	225—250	—
М210	50—90	—	—
М211, М212, М213	—	180—200	180—200
М300	50—180	—	—
М302, М303	200—280	—	—
М360	50—100	—	—
М361, М362, М363	—	90—200	90—200

* Асинхронные двигатели в исполнении по степени защиты IP23 имеют исполнение по способу монтажа только М101 с диапазоном высот оси вращения 160—560 мм.

В связи с изданием Публикации 34-7 МЭК был разработан и утвержден стандарт СЭВ 246-76 «Электрические машины. Формы исполнения и их условные обозначения», полностью базирующийся на указанной публикации МЭК. Стандарт СЭВ 246-76 после введения (декабрь 1979 г.) будет действовать в качестве государственного стандарта СССР, а ГОСТ 2479-65 до введения стандарта СЭВ сохранит свое действие; в дальнейшем, после соответствующего пересмотра, он будет включать только те исполнения машин, которые не вошли в вышеуказанную публикацию МЭК и стандарт СЭВ, но применяются в СССР.

Глава четвертая

УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

4-1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Надежность двигателей в большой степени зависит от того, насколько в их конструкции и исполнении предусмотрена способность противостоять воздействию климатических факторов внешней среды, в условиях которой двигатели должны эксплуатироваться.

К климатическим факторам внешней среды относятся: температура, влажность воздуха, давление воздуха или газа (высота над уровнем моря), солнечная радиация, дождь, ветер, пыль (в том числе снежная), резкие смены температуры воздуха, соляной туман, иней, действие плесневых грибов, содержание в воздухе коррозионно-активных элементов.

Таблица 4-1

Климатические исполнения двигателей

Исполнение двигателей	Обозначение
Двигатели, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах для макроклиматических районов	
с умеренным климатом	У
с холодным климатом	ХЛ
с влажным тропическим климатом	ТВ
с сухим тропическим климатом	ТС
как с сухим, так и с влажным тропическим климатом	Т
для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)	О
Двигатели, предназначенные для установки на морских судах для макроклиматических районов	
с умеренно холодным морским климатом	М
с тропическим морским климатом для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в тропической зоне	ТМ
для неограниченного района плавания	ОМ
Двигатели, предназначенные для всех макроклиматических районов на суше и на море	В

Исполнения двигателей для различных климатических районов, их категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования при воздействии климатических факторов внешней среды установлены ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70. Исполнения и категории размещения при эксплуатации приведены в табл. 4-1, 4-2.

В ГОСТ 15150-69 дана характеристика макроклиматических районов по условиям температуры и влажности, указано географическое положение различных районов на земном шаре, приведен перечень стран, относящихся к районам с влажным и сухим тропическим климатом, и отмечены границы районов с холодным климатом в СССР. Приведены для всех климатических исполнений рабочие и предельные значения температуры окружающего воздуха при эксплуатации, данные по значениям относительной влажности воздуха, нормы при воздейст-

вии на изделия содержащейся в воздухе пыли и коррозионно-активных агентов, а также верхние рабочие значения интегральной плотности теплового потока солнечной радиации и интенсивности дождя.

В условном буквенно-цифровом обозначении типоразмеров двигателей номер категории проставляется непосредственно после соответствующего буквенного обозначения климатического исполнения из табл. 4-1. Примеры условных обозначений приведены в § 6-3.

При испытаниях двигателей за нормальные значения климатических факторов принимают следующие: температура +25±10°С; относительная влажность воздуха 45—80%; атмосферное давление 84—106 кПа.

Таблица 4-2

Категории климатических исполнений в зависимости от мест размещения двигателей при эксплуатации

Характеристика категории	Обозначение
Для работы на открытом воздухе	1
Для работы в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха	2
Для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе	3
Для работы в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых и вентилируемых производственных и других помещениях)	4
Для работы в помещениях с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, в помещениях, в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке)	5

Двигатели общего назначения при отсутствии особых требований должны обеспечивать работу в макроклиматических районах с умеренным климатом — исполнение У, категория размещения 3 и 4 (ГОСТ 15543-70 и 15150-69).

4-2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Требования, предъявляемые к электрическим машинам в части воздействия на них внешних механических факторов, и методы соответствующих испытаний отражены в ГОСТ 16962-71.

ГОСТ 17516-72 устанавливает группы условий эксплуатации изделий М1—М31, характеризующиеся диапазонами частот вибрационных нагрузок, ускорениями, степенями жесткости, длительность ударов.

Электродвигатели общего назначения, к которым не предъявляется особых требований в части воздействия на них внешних механических факторов, относят к группе условий эксплуатации М1. К этой группе отнесены, например, асинхронные двигатели серии 4А (ГОСТ 19523-74). В группе М1 предусматривается размещение двигателей при эксплуатации непосредственно на стенах предприятий, фундаментах и т. п. при внешних источниках, создающих вибрации с частотой не выше 35 Гц;

на строительно-дорожных машинах (кроме вибрационных). Эта группа условий эксплуатации характеризуется диапазоном вибрационных нагрузок от 1 до 35 Гц с максимальным ускорением 0,5*g* при степени жесткости 1 по ГОСТ 16962-71. Ударные нагрузки отсутствуют.

Глава пятая

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

5-1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

По мере технического развития электрических машин уровень их энергетических показателей как в Советском Союзе, так и за рубежом изменялся незначительно.

Современный средний мировой уровень энергетических показателей низковольтных и высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, различных исполнений по степени защиты и способам охлаждения представлен на рис. 5-1,*а—в* и 5-2,*а—в* для всех применяемых чисел полюсов.

Коэффициент полезного действия двигателей с фазным ротором ниже указанного на рис. 5-1 и 5-2 примерно на 0,5—1,0% (большее снижение относится к низковольтным двигателям, меньшее — к высоковольтным), а коэффициент мощности практически сохраняется на том же уровне.

На рис. 5-3,*а—в* показан современный средний мировой уровень к. п. д. двигателей постоянного тока различных исполнений по степени защиты и способам охлаждения.

Следует обратить особое внимание на весьма важное обстоятельство, заключающееся в том, что практически не меняющемуся или изменяющемуся в сравнительно узких пределах уровню энергетических показателей в процессе технического развития рассматриваемых электрических машин сопутствует существенное повышение уровня использования их активной части. Это объясняется тем, что процесс технического развития электрических машин тесно связан с совершенствованием свойств магнитных и изоляционных материалов. Целесообразное сочетание уровней электромагнитных нагрузок с новыми свойствами электротехнических материалов обеспечивает сохранение примерно на одном и том же уровне суммы потерь в машинах и намагничивающих токов в их обмотках при неизменной полезной мощности.

В современной практике проектирования электрических машин, особенно таких машин массового производства, как асинхронные двигатели, широкое применение находят ЭВМ. При этом ставится задача выбора оптимального варианта. Критерием оптимума является наибольший экономический эффект для народного хозяйства, т. е. наименьшая сумма затрат на изготовление двигателя, включая стоимость материалов, и на его эксплуатацию в течение расчетного срока службы. При таком способе расчета энергетические показатели электрических машин не входят в задание на проектирование, их уровень определяется по оптимальному варианту машины.

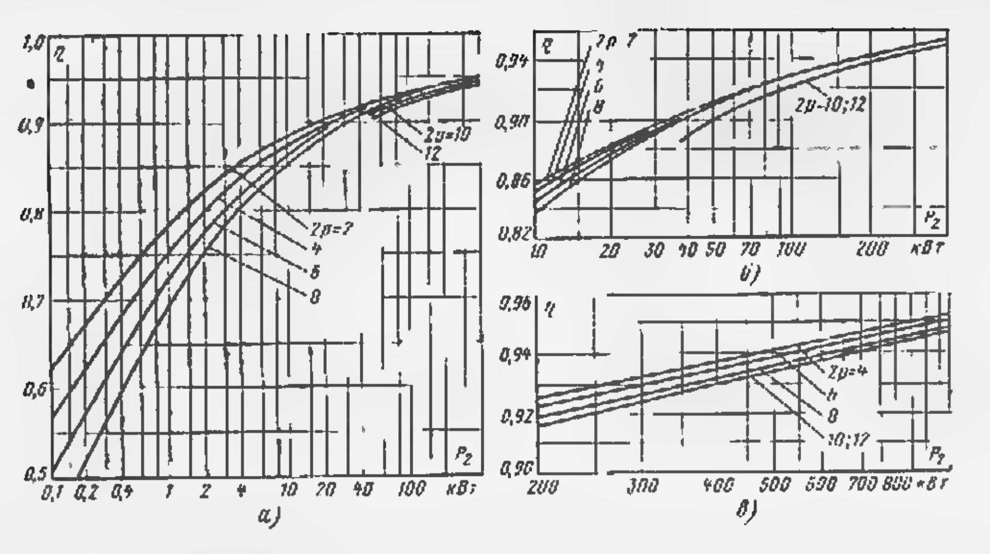


Рис. 5-1. Средние значения к. п. д. асинхронных двигателей.
а — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 на номинальные напряжения до 660 В, *б* — со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01 на номинальные напряжения до 660 В; *в* — со степенью защиты IP23 (IP22), IP44 и способом охлаждения IC0161 на номинальное напряжение 6000 В.

Рис. 5-2. Средние значения коэффициента мощности асинхронных двигателей.
а — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 на номинальные напряжения до 660 В; *б* — со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01 на номинальные напряжения до 660 В; *в* — со степенью защиты IP23(22) и способом охлаждения IC01 и со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0151 на номинальное напряжение 6000 В.

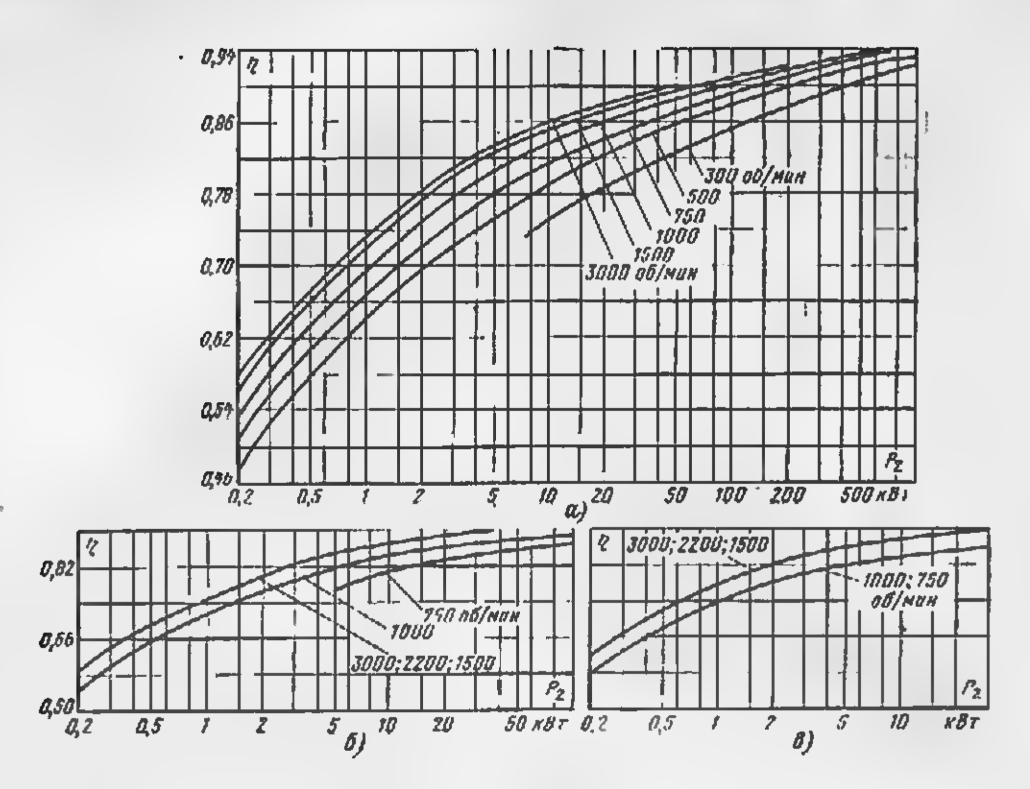


Рис. 5-3. Средние значения к. п. д. двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22 и способами охлаждения IC01 и IC17; со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37; *б* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141; *в* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0041.

Как показывает практика, электродвигатели общего назначения работают в большинстве случаев не при полной нагрузке, соответствующей их номинальной мощности, а с некоторой недогрузкой. Это объясняется тем, что двигатели выбирают для различных установок обычно с некоторым запасом по мощности. Статистикой установлено, что, например, асинхронные двигатели мощностью до 100 кВт в среднем бывают нагружены только на 60% номинальной мощности, а двигатели мощностью свыше 100 кВт — на 75%, поэтому упомянутые выше расчеты на ЭВМ с поиском оптимальных вариантов ведутся не для номинальной мощности, а для мощности, соответствующей коэффициенту загрузки 0,6 или 0,75. Для этих уменьшенных значений мощности ЭВМ и выбирает экономически наиболее целесообразный уровень энергетических показателей проектируемых двигателей. Результаты таких расчетов показывают, что к. п. д. двигателей при указанных частичных нагрузках получается не ниже, а в ряде случаев несколько выше, чем при полной нагрузке. Это обстоятельство необходимо учитывать и при выполнении расчета двигателей без ЭВМ.

Опыт проектирования отечественных серий двигателей, где был применен расчет на ЭВМ с поиском оптимальных вариантов, показал, что получаемые при этом энергетические показатели машин находятся обычно на уровне показателей современных или перспективных машин зарубежных серий, т. е. соответствуют примерно среднему современному мировому уровню.

Из сказанного может быть сделан вывод, что приведенные на рис. 5-1—5-3 значения энергетических показателей могут быть с достаточной степенью точности положены в основу электромагнитных расчетов машин при отсутствии ЭВМ.

Технические данные асинхронных двигателей отдельных серий приведены в приложениях 5 и 6, а двигателей постоянного тока — в приложениях 7—10.

5-2. ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Уровень пусковых характеристик асинхронных двигателей, к которым относятся кратности начального, минимального и максимального пусковых моментов вращения (не менее) и кратность начального пускового тока (не более), устанавливается для низковольтных двигателей серии 4А ГОСТ 19523-74. Указанный ГОСТ базируется на рекомендациях СЭВ.

МЭК проводит работу по созданию согласованных международных рекомендаций по уровню пусковых характеристик. В частности, намечено применить вместо кратности пускового тока предельные допустимые значения пусковой мощности. Окончание работы и выпуск рекомендаций намечены на ближайшие годы.

У электродвигателей западноевропейских капиталистических фирм значения кратности начального пускового момента существенно выше, чем у двигателей, выпускающихся в Советском Союзе и странах — членах СЭВ. Это объясняется тем, что в западноевропейской практике продолжает применяться способ пуска двигателей переключением обмотки статора со звезды на треугольник. Поскольку при этом начальный пусковой момент понижается в 3 раза, кратность пускового момента при номинальном напряжении должна иметь соответствующий запас, поэтому двигатели основного исполнения западноевропейских фирм по уровню кратности начального пускового момента практически соответствуют отечественной модификации двигателей с повышенным пусковым моментом (см. гл. 6). Уровень остальных пусковых характеристик асинхронных двигателей низкого напряжения западноевропейских фирм в основном соответствует уровню, принятому в СССР и в странах — членах СЭВ.

В приложении 5 приведены значения пусковых характеристик низковольтных двигателей серии 4А при $2p$—4; для двигателей на другие числа полюсов значения пусковых характеристик указаны в ГОСТ 19523-74.

В приложении 6 приведены значения пусковых характеристик высоковольтных двигателей серии А2 при $2p$—4; для двигателей на другие числа полюсов значения пусковых характеристик следует брать из ГОСТ 9362-68.

5-3. НОМИНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ДОПУСКАЕМЫЕ ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Номинальным режимом работы электрической машины называется режим работы, для которого машина предназначена предприятием-изготовителем и который указан на ее табличке.

Предписаниями ГОСТ 183-74, а также рекомендациями МЭК (Публикация 34-1, 1969 г.) установлены восемь типовых номинальных

режимов работы, которым присвоены обозначения, состоящие из буквы S и следующей за ней порядковой цифры (от 1 до 8). Наиболее часто двигатели общего назначения применяются для продолжительного режима работы (S1).

Согласно ГОСТ 183-74 номинальные данные электрических машин (мощность, напряжение, ток, частота вращения, к. п. д., коэффициент мощности и др.) относятся к работе машин на высоте до 1000 м над уровнем моря и при температуре газообразной охлаждающей среды +40°С.

Таблица 5-1

Предельные допускаемые превышения температуры частей электрических машин

№	Части электрических машин	Класс нагревостойкости					
		B		F		H	
		Превышения температуры, °С, при измерении					
		методом термометра	методом сопротивления	методом термометра	методом сопротивления	методом термометра	методом сопротивления
1	Обмотки: переменного тока машин мощностью менее 5000 кВ·А или с длиной сердечника менее 1 м; возбуждения машин постоянного тока, кроме указанных в п. 2, 3 настоящей таблицы; якорные, соединенные с коллектором	70	80	85	100	105	125
2	Однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями	90	90	110	110	135	135
3	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	80	80	100	100	125	125
4	Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с изолированными обмотками	80	—	100	—	125	—
5	Коллекторы и контактные кольца, незащищенные и защищенные	80	—	90	—	100	

Примечание. Для стержневых обмоток ротора асинхронных машин допускается по согласованию с заказчиком иметь превышения температуры по п. 2.

При достаточно длительной работе электрической машины температура ее частей достигает практически установившихся значений. Разность между практически установившейся температурой отдельной части электрической машины и температурой охлаждающей среды называется превышением температуры этой части электрической машины и регламентируется ГОСТ 183-74 (табл. 5-1).

Предельные допускаемые температуры для изоляционных материалов согласно ГОСТ 8865-70 равны: для изоляции класса нагревостойкости B 130°С, класса F 155°С и класса H 180°С. При работе электродвигателей в номинальном режиме и предусмотренной для этого

режима максимальной температуре охлаждающей среды температура в наиболее нагретом месте изоляции не должна превышать вышеуказанных предельно допускаемых температур для данного класса нагревостойкости изоляции.

Предельно допускаемые температуры обмоток и соприкасающихся с ними стальных частей, определенные сложением превышений температуры из табл. 5-1 с температурой охлаждающей среды, равной +40°С, как правило, меньше допускаемых температур по классу нагревостойкости изоляции. Это объясняется необходимостью иметь некоторый запас на самую горячую точку обмотки, так как измерение температуры обмоток методом сопротивления не учитывает неравномерности нагрева, а дает только среднее значение температуры. Для допускаемой температуры сердечников также введен известный запас ввиду недостаточной точности измерения методом термометра.

Указанные в табл. 5-1 (п. 5) классы нагревостойкости изоляционных материалов относятся к изоляции коллекторов и контактных колец или же к изоляции присоединенных к ним обмоток, если класс изоляции последних ниже класса изоляции коллектора или контактных колец. Допускаемые превышения температуры коллекторов и контактных колец могут превосходить значения, указанные в табл. 5-1, при соблюдении следующих условий:

если превышения температуры изоляционных материалов коллектора и контактных колец и связанных с ними обмоток не будут превосходить значений, указанных в табл. 5-1 для материалов соответствующих классов нагревостойкости;

если температура не будет достигать значений, опасных для паек соединений, и не ухудшит коммутацию;

если при изоляции классов F и H применяется легированная медь или иной материал, сохраняющий твердость при повышенных рабочей и технологической температурах.

Основным методом измерения превышения температуры обмоток является метод сопротивления (ГОСТ 11828-66).

Применение метода термометра для измерения превышения температуры обмоток допускается только в тех случаях, когда метод сопротивления по каким-либо причинам не может быть применен.

Для подшипников качения электрических машин регламентируется не предельное допускаемое превышение температуры, а предельная допускаемая температура, равная 100°С.

При тепловом расчете и при испытаниях макетных и опытных образцов машин проектируемых серий обычно учитывается необходимость иметь известный запас в превышениях температуры частей, обусловливаемый как недостаточной точностью методик тепловых расчетов, так и технологическими отклонениями при серийном выпуске машин. Этот запас приблизительно равен 10% допускаемых превышений температуры, указанных в табл. 5-1.

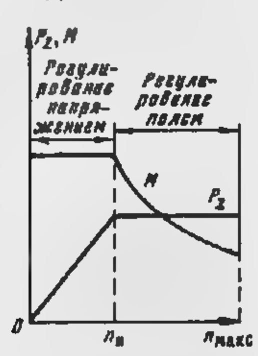
5-4. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

а) Двигатели постоянного тока

Регулирование частоты вращения вверх от номинальной у двигателей постоянного тока осуществляется ослаблением магнитного поля главных полюсов. При этом номинальная частота вращения соответствует полному магнитному потоку и является наименьшей. При таком

способе регулирования частоты вращения мощность двигателей постоянна. В тех случаях, когда повышение частоты вращения сверх некоторого максимального значения $n_{макс}$ сопровождается значительным ухудшением коммутации, мощность двигателя при продолжительном режиме работы на повышенной частоте должна быть ниже номинальной (рис. 5-4).

Регулирование частоты вращения вниз от номинальной осуществляется изменением напряжения на якоре. При этом номинальная частота вращения двигателя будет наибольшей. При таком способе регулирования частоты вращения момент двигателя постоянен (рис. 5-4). В тех случаях, когда понижение частоты вращения сопровождается ухудшением охлаждения (в машинах с самовентиляцией), нагрузочный момент двигателя при продолжительном режиме работы на пониженной частоте должен быть ниже номинального (рис. 5-5).



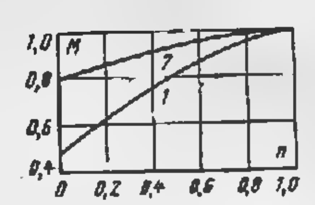


Рис. 5-4. Характеристики изменения мощности P_2 и момента M двигателя постоянного тока при регулировании частоты вращения вверх и вниз от номинальной $n_н$.

Рис. 5-5. Характеристика изменения момента двигателей постоянного тока при регулировании частоты вращения вниз от номинальной.

1 — степень защиты IP44 и способ охлаждения IC0141; степень защиты IP22 и способ охлаждения IC01; 2 — степень защиты IP44 и способ охлаждения IC0041.

При независимой вентиляции с подводом воздуха по трубам или с независимым двигателем-вентилятором эффект охлаждения практически не зависит от частоты вращения регулируемого двигателя. Момент при этом может оставаться постоянным и равным номинальному во всем диапазоне регулирования частоты вращения вниз от номинальной.

В двигателе могут совмещаться оба указанных способа регулирования частоты вращения.

Таблица 5-2

Максимальные допустимые частоты вращения, об/мин, при ограниченном диапазоне (до 1:2) регулирования ослаблением поля главных полюсов

Высота оси вращения h, мм	Номинальная частота вращения, об/мин						
	3000	2200	1500	1000	750	600	500
80—112	3500	3200	3000	2000	1500	—	—
132; 160	3200	3100	3000	2000	1500	1200	—
180; 200	3000	3000	2500	2000	1500	1200	—
225; 250	—	2700	2300	1800	1500	1200	1000
280; 315	—	—	2000	1500	1500	1200	1000

У двигателей общего назначения с высотами оси вращения до 315 мм включительно, степенью защиты IP22 и IP44, выполняемых без компенсационной обмотки, допустимый диапазон регулирования частоты вращения ослаблением поля главных полюсов зависит от номинальной частоты, мощности (высоты оси вращения) и в современных сериях не превышает отношения 1 : 2 (табл. 5-2).

Имеются серии двигателей, в которых допускаются бо́льшие диапазоны регулирования частоты вращения (до 1 : 4), но при этом из-за ухудшения условий коммутации мощность на высоких частотах снижена. Например, фирма АЕГ (ФРГ) в серии G225—G299 (h=125÷400 мм) при диапазоне регулирования частоты вращения свыше 1: 1,25 предусматривает следующее снижение мощности:

Частота вращения, о. е.	1,25	2	3	4	5	6
Мощность, о. е.	1	0,84	0,7	0,62	0,55	0,5

На базе основного исполнения серии двигателей постоянного тока общего назначения со степенью защиты IP22 предусмотрена модификация, допускающая широкий диапазон регулирования (табл. 5-3).

Таблица 5-3

Максимальные допустимые частоты вращения, об/мин, при широком диапазоне (до 1:4) регулирования ослаблением поля главных полюсов

Высота оси вращения h, мм	Номинальная частота вращения, об/мин						
	3000	2200	1500	1000	750	600	500
80; 90	4400	4300	4300	3000	3000	—	—
100; 112	4300	4300	4000	3000	3000	—	—
132; 160	4000	4000	4000	2500	2500	1800	—
180; 200	4000	3500	3500	2500	2000	1800	—
225; 250	—	3000	3000	2000	1800	1500	1250
280; 315	—	—	2250	2000	1800	1500	1250

У двигателей с высотами оси вращения более 315 мм, снабженных компенсационной обмоткой, диапазон регулирования частоты вращения вверх от номинальной при постоянной мощности может достигать 1 : 5.

б) Асинхронные двигатели с фазным ротором

Асинхронные двигатели с фазным ротором допускают регулирование частоты вращения вниз от номинальной с помощью регулировочного реостата, включаемого в цепь ротора. При независимой вентиляции вращающий момент двигателя может оставаться постоянным, равным номинальному во всем диапазоне регулирования частоты вращения. При самовентиляции допустимый момент в зависимости от частоты вращения снижается; средние значения уменьшения момента составляют:

Частота вращения, о. е.	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
Допустимый момент, о. е.	1,0	0,96	0,91	0,85	0,80	0,72	0,62

в) Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором

Частоту вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором можно устойчиво регулировать вниз от номинальной в пределах до 1 : 10 при питании их от тиристорных преобразователей частоты. При этом закон регулирования напряжения должен обеспечивать постоянство магнитного потока двигателя во всем диапазоне регулирования частоты, т. е.

$$(U_1 - I_1 r_1)/f = \text{const},$$

где f — переменная частота питания, Гц; I_1 и r_1 — ток, А, и сопротивление, Ом, обмотки статора.

Ухудшение условий охлаждения при понижении частоты вращения, а также несинусоидальность выходного напряжения тиристорных преобразователей частоты приводят к необходимости снижения вращающего момента двигателя для ограничения превышений температуры частей машины. В частности, для двигателей единой серии 4А основного исполнения со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 допустимая мощность $P_{2доп}$ для продолжительного режима работы при питании от тиристорного преобразователя может быть приближенно определена для различных частот из следующей эмпирической зависимости [Л. 21]:

$$P_{2доп} = \frac{f - 1,75\sqrt{p}}{50 - 1,75\sqrt{p}} \; \frac{p + 7,2}{p + 8,64} P_2. \qquad (5\text{-}1)$$

Несинусоидальность кривой выходного напряжения тиристорного преобразователя частоты понижает к. п. д. двигателей при $f = 50$ Гц в среднем на 2—4%, а коэффициент мощности — на 0,05. При регулировании частоты от 50 до 5 Гц к. п. д. снижается от исходного значения 85—91% до значения 40—50%, а скольжение увеличивается от исходного значения 2—9% до значения 15—20%.

5-5. ДОПУСКАЕМЫЕ ПЕРЕГРУЗКИ, ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МАССО-ГАБАРИТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Согласно ГОСТ 183-74 двигатели постоянного тока должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать перегрузку по току на 50% в течение 1 мин, а асинхронные двигатели мощностью 0,55 кВт и выше — в течение 2 мин. Асинхронные двигатели мощностью до 0,55 кВт должны по ГОСТ 16264-70 выдерживать режим короткого замыкания при номинальном напряжении в течение 5 с. Регулируемые двигатели должны обеспечивать возможность указанных перегрузок как при номинальной, так и при максимальной частотах вращения.

К двигателям постоянного тока с высотами оси вращения более 315 мм и с компенсационной обмоткой, предназначаемым для тяжелых условий работы, практикой предъявляются требования кратковременной рабочей перегрузки на 150% при номинальной и на 75% при максимальной частотах вращения.

В отдельных зарубежных сериях, в частности фирм США и Японии, асинхронные двигатели и двигатели постоянного тока допускают при номинальной частоте вращения длительную перегрузку на 15% за счет того, что при номинальной мощности превышение температуры

обмоток двигателей ниже максимально допускаемого для примененного класса изоляции. Например, при классе изоляции В превышение температуры обмоток составляет 60° вместо допускаемого 80°. Такой запас по нагреву («сервис-фактор») значительно расширяет возможный диапазон регулирования частоты вращения при номинальном моменте, создает возможность эксплуатации двигателей при температуре окружающей среды выше 40°С и на высоте более 1000 м. Вместе с тем у таких двигателей несколько увеличенные размеры, масса и стоимость. Однако в последние годы фирмы США, стремясь по возможности максимально использовать материалы в двигателях из-за конкуренции с европейскими фирмами по уровню массы, стали отказываться от применения «сервис-фактора». Это относится в первую очередь к сериям закрытых машин.

К числу важнейших свойств двигателя относятся его динамические свойства, от которых, как и от свойств рабочего механизма, зависит характер переходного режима электропривода. Эти свойства двигателя могут оцениваться рядом показателей, из которых для двигателей общего назначения обычно приводят в каталогах маховой момент ротора или якоря. Стремление к понижению высоты оси вращения двигателя ведет к уменьшению наружного диаметра и к соответствующему увеличению длины сердечника ротора или якоря, что благоприятно отражается на маховом моменте GD^2. Сравнение этого показателя динамических свойств двигателей целесообразно проводить по отношению махового момента к номинальному вращающему моменту

$$GD^2/M_н \text{ или } GD^2n/P_2.$$

При проектировании электропривода можно оперировать не маховым моментом, а моментом инерции J, кг·м²,

$$J=GD^2/4g, \qquad (5\text{-}2)$$

где GD^2 — маховой момент, Н·м²; g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

Для асинхронных двигателей, используемых в циклическом режиме работы, важным показателем является допустимое число пусков и реверсов в 1 ч при холостом ходе двигателя, приводимое в каталогах или справочниках.

Массо-габаритные показатели асинхронных двигателей с одинаковыми числами полюсов, а также двигателей постоянного тока с одинаковыми номинальными частотами вращения сравнивают по отношению массы к полезной мощности двигателя $G_{дв}/P_2$. У двигателей постоянного тока с несовпадающими номинальными частотами вращения сравнение массо-габаритных показателей целесообразно производить по отношению массы двигателей к номинальному вращающему моменту $G_{дв}/M_н$ или $G_{дв}n/P_2$.

5-6. ШУМ, ВИБРАЦИЯ

Допустимые уровни шума электрических машин в режиме холостого хода установлены ГОСТ 16372-70, который распространяется на машины общего и специального назначения мощностью от 0,25 до 1000 кВт при номинальной частоте вращения до 4000 об/мин. Стандарт учитывает рекомендации СЭВ. В качестве нормируемого параметра для

оценки уровня шума принимают средний уровень звука по шкале А на расстоянии 1 м от контура машины.

В зависимости от требований к уровню шума электрические машины разделяются ГОСТ 16372-70 на классы 0; 1, 2, 3; 4. Машины общего назначения, как правило, относятся к классу 1.

Для отдельных серий электрических машин допустимые уровни шума с указанием соответствующего класса должны оговариваться в стандартах или технических условиях на эти машины. Например, для двигателей серии 4А ГОСТ 19523-74 устанавливает средние значения уровня звука по шкале А, которые несколько меньше приведенных в ГОСТ 16372-70 для машин класса 1.

Допустимые уровни вибрации электрических машин установлены ГОСТ 16921-71, который распространяется на машины общего и специального назначения с массой от 0,25 до 2000 кг и номинальной частотой вращения от 600 до 12 000 об/мин. Стандарт учитывает рекомендации СЭВ.

В качестве нормируемого параметра вибрации электрической машины принимается наибольшее из эффективных значений вибрационной скорости, измеренных в соответствии с ГОСТ 12379-66, для диапазона от рабочей частоты вращения до 2000 Гц.

Для оценки вибрации собранных машин при их выпуске с предприятия-изготовителя устанавливается восемь классов. Индексы классов соответствуют максимально допустимой для данного класса вибрационной скорости.

Для электрических машин общего назначения вида М10 по ГОСТ 2479-65 (см. § 3-3) рекомендуется принимать следующие классы вибрации:

Высота оси вращения h, мм	До 71	80—112	132—200	225 и более
Класс вибрации	1,1	1,8	2,8	4,5

Уравновешивание роторов или якорей должно выполняться в соответствии с ГОСТ 12327-66. Рекомендуемая точность уравновешивания для роторов — по второму классу, а для якорей — по первому классу.

5-7. ТРЕБОВАНИЯ К КОММУТАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Искрение на коллекторе двигателей постоянного тока оценивается по степени искрения под сбегающим краем щетки по шкале, приведенной в ГОСТ 183-74. Для каждой степени 1; $1\frac{1}{4}$; $1\frac{1}{2}$; 2; 3 шкалы в ГОСТ 183-74 даны характеристика искрения и состояние коллектора и щеток.

Допустимая степень искрения двигателей постоянного тока единых серий и их модификаций указывается в технических заданиях на разработку этих машин, в технических условиях или стандартах. Если степень искрения машин не оговорена, то она при номинальном режиме работы машины должна быть не выше $1\frac{1}{2}$.

Отдельные зарубежные стандарты, в том числе стандарт NEMA (США), оценивают коммутацию как нормальную в том случае, если щетки и коллектор не подгорают и не повреждаются при перегрузке, а также если не требуется повышенного ухода при эксплуатации. Наличие видимого искрения не служит доказательством плохой коммутации.

Глава шестая

МОДИФИКАЦИИ СЕРИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ НА БАЗЕ ОСНОВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

6-1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА МОДИФИКАЦИЙ

В единых сериях электродвигателей для наиболее полного удовлетворения нужд различных отраслей народного хозяйства предусматривается ряд модификаций, а также исполнений специального назначения, которые выполняются на базе основного исполнения машин с внесением расчетных, конструктивных или иных изменений, касающихся применения специфических изоляционных материалов для витковой и корпусной изоляции, пропиточных лаков, покровных эмалей, особой окраски машин, отклонений от основного исполнения по мощности и т. д. Все модификации и специальные исполнения должны разрабатываться с учетом наибольшей возможной унификации деталей и сборочных единиц с основным исполнением машин

В отечественных единых сериях асинхронных двигателей, например серии 4А, основное исполнение которой предназначено для применения в приводах, не предъявляющих специальных требований по пусковым, рабочим характеристикам и скольжению, и для эксплуатации в макроклиматических районах с умеренным климатом У при категории размещения 3, предусматриваются модификации и исполнения:

двигатели электрических модификаций: с повышенным пусковым моментом; с повышенным скольжением; с переключением чисел полюсов; на частоту сети 60 Гц; однофазные с пусковым сопротивлением, с пусковым конденсатором, с рабочим конденсатором, с пусковым и рабочим конденсаторами; с фазным ротором (двигатели с фазным ротором с высотой оси вращения 280 мм и более относятся к основному исполнению); десятиполюсное с высотой оси вращения 250 мм (только в исполнении IP44); малошумные;

двигатели специальных исполнений по условиям климата и окружающей среды: для макроклиматических районов с холодным климатом, с тропическим климатом, с морским климатом, для предприятий с химически активными средами, для сельскохозяйственного производства;

двигатели специальных исполнений по установочным размерам. с привязкой мощностей к установочным размерам по стандарту CENEL (DIN); встраиваемые; с повышенной точностью по установочным размерам; с высокой точностью по установочным размерам;

двигатели специальных исполнений для узких областей применения: фреономаслостойкие — для привода бессальниковых компрессоров, для лифтов, для полиграфических машин, швейных машин и т. п.;

двигатели с дополнительными устройствами: со встроенной температурной защитой; со встроенным электромагнитным тормозом для станков и электрических талей и др.

В современных отечественных единых сериях машин постоянного тока по аналогии с едиными сериями асинхронных двигателей помимо основного исполнения машин производится широкая номенклатура различных модификаций и специальных исполнений, к которым относятся генераторы со смешанным, параллельным и независимым возбуждением, двигатели с последовательным возбуждением, двигатели с широ-

кими пределами регулирования частоты вращения ослаблением поля главных полюсов, исполнительные двигатели для привода высокоточных станков и механизмов, машины для морских судов гражданского флота, машины для холодного климата и др.

Разработку модификаций и специальных исполнений электрических машин выполняют в соответствии с техническими заданиями, в которых устанавливаются все основные требования, относящиеся к электрическим, механическим, тепловым, климатическим и прочим характеристикам машин, указываются диапазоны мощностей или высот оси вращения, охватываемые данным исполнением, даются рекомендации по применению в конструкции машин той или иной степени защиты, по выполнению отдельных элементов конструкции.

Ниже приведены в качестве примера основные технические требования, предъявляемые к наиболее широко применяемым модификациям асинхронных двигателей серии 4А с повышенным пусковым моментом и повышенным скольжением.

6-2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МОДИФИКАЦИЯМ СЕРИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

а) Двигатели с повышенным пусковым моментом

Двигатели данной модификации должны выполняться с высотами оси вращения 160—250 мм. Исполнение по степени защиты IP44. Мощности соответствуют мощностям двигателей основного исполнения. Синхронные частоты вращения 1500, 1000 и 750 об/мин. Кратность начального пускового момента не менее 1,8—2,0, минимального момента — 1,5—1,6, максимального момента — 2,0—2,2 (меньшие значения относятся к машинам с числом полюсов $2p=8$). Кратность начального пускового тока не более 7,5.

Изготовление всех узлов и деталей двигателей, за исключением активной части ротора и обмотки статора, предусматривается по технической документации двигателей основного исполнения.

б) Двигатели с повышенным скольжением

Исполнение по степени защиты IP44. Синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин. Диапазон высот оси вращения при $2p=2$ 71—132 мм; при $2p=4$, 6, 8 71—250 мм. Кратность начального пускового момента не менее 1,8—2,1, максимального момента — 2,0 2,2, начального пускового тока — не более 6,0—7,5 (меньшие значения относятся к большим числам полюсов).

Номинальную кратность минимального момента устанавливают на основании результатов испытаний опытных образцов. Номинальное значение скольжения при максимальном моменте должно быть не менее 40%. Допустимое отклонение скольжения при максимальном моменте равно −20% регламентируемого значения; отклонение в противоположную сторону не ограничивается.

Номинальный режим работы двигателей — повторно-кратковременный (S3 по ГОСТ 183-74) с продолжительностью включения ПВ=40%. Номинальная мощность принимается равной наибольшей допустимой по нагреву мощности при ПВ=40%. Наибольшие допустимые по нагреву мощности при ПВ=60 и 100% не должны превышать номиналь-

ной мощности двигателей. При ПВ—15% кратность максимального момента должна быть не менее 1,6.

Изготовление всех узлов и деталей двигателей, за исключением активной части ротора и обмотки статора, предусматривается по технической документации двигателей основного исполнения. Короткозамкнутая клетка ротора выполняется литой из алюминиевых сплавов повышенного сопротивления.

в) Прочие модификации и двигатели специального исполнения

Технические требования к другим модификациям и двигателям специального исполнения серий асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока изложены в ГОСТ, технических условиях или каталогах.

В табл. 6-1 показана возможная унификация асинхронных двигателей модификаций и специальных исполнений с двигателями основного исполнения серии. Элементы активной части и конструкции двигателей модификаций и специальных исполнений, отличающиеся от соответствующих элементов двигателей основного исполнения, обозначены в таблице крестиками, а отсутствие элементов конструкции обозначено тире.

Перспективным является создание двигателей единого исполнения по условиям окружающей среды, заменяющих холодостойкие, химостойкие, тропические машины.

6-3. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ СЕРИЙ И ТИПОВ, МОДИФИКАЦИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ

Условные обозначения серий и типов электрических машин установлены отраслевым стандартом Министерства электротехнической промышленности ОСТ 160.684.012-72 «Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения серий и типов».

Условные обозначения типов машин составляются по структурной схеме в следующем порядке:

1. Порядковый номер серии или порядковое исполнение типа электрической машины после очередной модернизации.
2. Вид электрической машины.
3. Исполнение по степени защиты, способ охлаждения.
4. Материал станины и подшипниковых щитов, а также встраиваемое исполнение.
5. Электрическая модификация или специальное исполнение.
6. Высота оси вращения или внешний диаметр сердечника статора или якоря.
7. Установочный размер по длине корпуса, длина сердечника статора или якоря.
8. Число полюсов или число щеток, приходящихся на один бракет.
9. Специальное исполнение по конструкции.
10. Климатическое исполнение и категория размещения.

Каждой позиции структурной схемы (от 1 до 10) соответствует в стандарте таблица под таким же номером, содержащая перечень буквенных и цифровых обозначений, относящихся к данной позиции.

Ниже в качестве примера приведены характерные условные обозначения электрических машин, составленные в соответствии с указаниями отраслевого стандарта.

Таблица 6-1

Особенности двигателей электрических модификаций и специальных исполнений серии 4А по сравнению с основным исполнением

Модификации и специальные исполнения	Активная часть: Статор		Активная часть: Ротор		Элементы конструкции												Диапазон высот оси вращения, мм
	Выполнение обмотки	Изоляция, пропитка, покрытие	Штамп	Материал обмотки	Станина	Щит подшипниковый со стороны привода	Щит подшипниковый со стороны вентилятора	Вал	Подшипники	Смазка подшипников	Вентилятор	Кожух вентилятора	Вводное устройство	Специальные устройства	Окраска и покрытия	Точность изготовления	
С повышенным пусковым моментом	×		×														160—250
С повышенным скольжением	×		×[1]	×													71—250
С переключением чисел полюсов	×		×[2]		×[3]								×				50—355
На частоту 60 Гц	×[4]												×[4]				50—355
Однофазные	×												×	×			60—71
С фазным ротором			×	×				×			×	×		×			160—355
Встраиваемые					—	—	—	—	—	—	×	—	—	—	—		50—355
Со встроенным электромагнитным тормозом							×	×			×	×		×			50—160
Малошумные	×		×[5]									×					50—160
Со встроенной температурной защитой													×	×			50—355

Продолжение табл. 6-1

Модификация и специальные исполнения	Активная часть: Статор: Выполнение обмотки	Активная часть: Статор: Изоляция, пропитка, покрытие	Активная часть: Ротор: Штамп	Активная часть: Ротор: Материал обмотки	Элементы конструкции: Станина	Элементы конструкции: Щит подшипниковый со стороны: привода	Элементы конструкции: Щит подшипниковый со стороны: вентилятора	Элементы конструкции: Вал	Элементы конструкции: Подшипники	Элементы конструкции: Смазка подшипников	Элементы конструкции: Вентилятор	Элементы конструкции: Кожух вентилятора	Элементы конструкции: Вводное устройство	Элементы конструкции: Специальные устройства	Элементы конструкции: Окраска и покрытия	Элементы конструкции: Точность изготовления	Диапазон высот оси вращения, мм
С повышенной точностью по установочным размерам																×	50—250
Высокоточные					×	×	×	×	×[3]		×	×		×		×	50—180
С установочными размерами по CENEL					×[4]											[illegible]	50—250; 315
По условиям климата и окружающей среды: влагоморозостойкие	—							×[7]					×[1]				50—355
химостойкие	×[7]										×[7]	×[7]					50—355
для сельского хозяйства		×				×	×	×		×			×		×		50—180
для холодного климата									×								50—250
тропические	×[7]							×[7]			×[1]	×[1]	×				50—355
Для судов морского и речного флота		×				×	×			×					×		50—355
Для лифтов (малошумные)	×		×	×[8]								×[8]					71—250
Фреономаслостойкие	×	×			—	—	—	—	—	—	—	—	—		—		112—250

[1] Отличается от основного исполнения только для двигателей с $h = 112 \div 250$ мм. [2] То же с $h = 160 \div 355$ мм. [3] То же с $h = 280 \div 355$ мм. [4] Для двигателей на напряжение 220/440 В. [5] То же с $h = 150$ мм. [6] То же с $h = 50 \div 250$ мм. [7] То же с $h = 280 \div 355$ мм. [8] То же с $h = 180 \div 250$ мм.

4А132S4У3 — асинхронный двигатель трехфазного тока четвертой серии в исполнении по степени защиты IP44, способ охлаждения IC0141, с короткозамкнутым ротором, со станиной и щитами из черного металла; двигатель имеет высоту оси вращения 132 мм, корпус малой длины и все связанные с ними прочие установочные размеры по рекомендациям МЭК (ГОСТ 18709-73); число полюсов 4; климатическое исполнение У; категория размещения 3.

2ПН355М10У4 — машина постоянного тока второй серии в исполнении по степени защиты IP22, способ охлаждения IC01; машина имеет высоту оси вращения 355 мм, корпус средней длины и все связанные с ними установочные размеры по рекомендациям МЭК и ГОСТ 18709-73; число щеток на бракете 10; климатическое исполнение У; категория размещения 4.

Глава седьмая

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

7-1. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Создание новых серий электрических двигателей с улучшенными технико-экономическими показателями невозможно без применения усовершенствованных материалов, в том числе электроизоляционных.

Свойства электроизоляционных материалов должны удовлетворять в первую очередь требованиям электрической и механической прочности, надлежащей нагревостойкости, технологичности.

В зависимости от назначения материалы подразделяются на следующие группы:

1) материалы, несущие основную функцию (например, материалы, изолирующие катушки обмоток статора, фазного ротора или якоря). Эти материалы должны обладать в первую очередь высокой электрической прочностью;

2) материалы, несущие вспомогательную функцию (например, материалы для выкладки пазов). Эти материалы защищают основную изоляцию от механических воздействий в процессе производства и эксплуатации и должны обладать повышенной механической прочностью.

Большая часть аварий электрических двигателей в эксплуатации происходит из-за различных нарушений изоляции при их изготовлении. Поэтому при проектировании особое внимание должно быть уделено электроизоляционной конструкции и изоляционным материалам.

Развитие электромашиностроения сопровождается повышением класса нагревостойкости применяемых электроизоляционных материалов. В настоящее время электрические двигатели с изоляцией класса нагревостойкости А практически не изготовляют. Небольшое применение в малых двигателях имеет изоляция класса Е, а в основном двигатели изготовляют с изоляцией классов нагревостойкости В и F. В ряде двигателей, в частности двигателей, работающих в тяжелых условиях, находит применение изоляция класса нагревостойкости Н, поэтому ни-

Таблица 7-1

Номенклатура и марки электроизоляционных материалов, применяемых в электродвигателях

Группа	Материал: Наименование	Материал: Марка	Класс нагревостойкости	ГОСТ или ТУ
Неорганические волокнистые материалы	Стеклолакоткань	ЛСБ-105/120 ЛСП-130/155 ЛСК-155/180	B F H	ГОСТ 10156-70
	Лента стеклянная	ЛЭС	(B, F, H)*	ГОСТ 5937-68
	Нетканая стекловолокнистая лента	ЛСБ-В ЛСБ-F	B F	ТУ6.11.22-70 ТУ6.11.233-71
	Асбестовая бумага	—	B, F	ГОСТ 9426-75
Слюдяные материалы	Микалента	ЛФЧ-ББ ЛФК-ТТ	B F, H	ГОСТ 4268-75
	Формовочный миканит	ФФГ ФФП ФФК	B F H	ГОСТ 6122-75
	То же	ФФГА ФФПА ФФКА	B F H	ГОСТ 6122-75
	Коллекторный миканит	КФГ КФП КФА	B F H	ГОСТ 2196-75
	Прокладочный миканит	ПФГ ПФК	B F, H	ГОСТ 6121-75
	Стеклослюдинитовая лента	ЛСПЭ934-ТП	B, F	ТУ21.25.111-73
	Стеклослюдопластовая лента	ЛИ-СК-ТТ ЛИ-СК$_у$-ТТ	B, F	—
	Слюдопластофолий	ИФГ-Б	B	ГОСТ 19760-74
	Лакотканеслюдопласт	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ ГИП-ЛСП-ЛСЛ ГИК-ЛСК-ЛСЛ	B F H	ТУ16.503.052-74
Синтетические пленки и бумаги	Полиимидная пленка	ПМ	F, H	ТУ6.05.051.25-73
	Фениловая бумага	—	F, H	—
	Пленкосинтокартон	ПСК-Л ПСК-Ф ПСК-Н	B F H	ТУОАИ503.147-74
	Синтофолий	Синтофолий-F Синтофолий-Н	F H	—
	Пленкостеклопласт	Изофлекс Имидофлекс	B F, H	ТУ16.503.114-74 ТУ16.503.145-75

Группа	Материал		Класс нагревостойкости	ГОСТ или ТУ
	Наименование	Марка		
Прочие	Электрошит	—	В, F	ТУ38.114.146-75
	Телефонная бумага	КТН	В	ГОСТ 3553-73
	Стеклотекстолит	СТ СТЭФ СТК	В F Н	ГОСТ 12652-74
	Пластмасса	К6 АГ4С	В F	ГОСТ 5989-73 ГОСТ 20437-75

* Класс изоляции в зависимости от пропиточного лака.

же рассматривается номенклатура изоляционных материалов классов нагревостойкости В, F и Н.

Не всегда применяемую изоляцию используют на предельно допускаемом для нее превышении температуры. Так, для двигателей, устанавливаемых на особо ответственных объектах, применяют изоляцию класса нагревостойкости F, а превышение температуры частей двигателей допускают по классу В.

Не используют также допускаемое превышение температуры выбранного класса изоляции при необходимости улучшить некоторые технические показатели, например к. п. д. двигателей, коммутационные параметры двигателей постоянного тока, пусковые характеристики асинхронных двигателей и др.

Электроизоляционные материалы в зависимости от входящих в них компонентов подразделяют на следующие основные группы (табл. 7-1):

неорганические волокнистые материалы. Наибольшее распространение в этой группе находят стекловолокнистые материалы, обладающие высокой нагревостойкостью, малой гигроскопичностью, большой механической прочностью на разрыв, но вместе с тем пониженной стойкостью к изгибу, истиранию и ударам;

слюдяные материалы. Слюда находит широкое применение в изоляции электродвигателей благодаря своим высоким показателям по электрической и механической прочности, нагревостойкости, влагостойкости. Одним из главных слюдяных материалов является миканит. В зависимости от сочетания слюды с подложками или клеящими лаками имеются различные виды миканита. За последние годы дефицитная щепаная слюда, идущая на изготовление миканитов, все больше заменяется новыми материалами — слюдинитом и слюдопластом, образующими в сочетании с подложками и лаками большую номенклатуру изоляционных материалов;

синтетические пленки и бумаги. Изоляционные пленочные и бумажные материалы из синтетических смол обладают высокой электрической и механической прочностью, применение их дает возможность значительно уменьшить толщину пазовой изоляции и повысить коэффициент заполнения медью пазов двигателя. В разных сочетаниях эти материалы применяют в виде композиционных (составных). Кроме того, для изолирования сердечников двигателей постоянного тока с высотами оси вращения до 200 мм включительно может применяться напыление из порошка эпоксидной смолы для изоляции классов В и F или полиимидаэфирных порошков для изоляции класса Н.

Для обмоток электрических двигателей применяют главным образом медные провода с эмалевой и волокнистой изоляцией. Класс нагревостойкости этих проводов зависит от химического состава эмалевого лака, от рода волокнистого материала и подклеивающего состава.

Провода марок ПСД и ПСДТ со стекловолокнистой изоляцией, проклеенной лаком ФЛ 97 (МРТУ 6.10.655-67), относятся по нагревостойкости к классу. F. Провода марок ПСДК и ПСДКТ со стекловолокнистой изоляцией, проклеенной кремнийорганическим лаком КО 916 (ГОСТ 16508-70), соответствуют по нагревостойкости классу Н.

Провода с волокнистой изоляцией постепенно вытесняются эмалированными проводами, так как изоляция последних имеет значительно меньшую толщину, обладает большей теплопроводностью и влагостойкостью. Скользкая гладкая поверхность эмалированных проводов облегчает укладку всыпной обмотки в полузакрытые пазы, позволяет повысить коэффициент заполнения пазов медью.

Наиболее широкое применение находят эмалированные провода круглого поперечного сечения марок ПЭТВ и ПЭТ-155. Провода марки ПЭТВ (ОСТ 16.0.505-001-74) обладают пониженной стойкостью к тепловым ударам и действию растворителей. Класс нагревостойкости эмалированных проводов зависит от пропиточного лака; пропитанные лаками МЛ-92 (ГОСТ 15865-70) и ПЭ933 (ТУ 6.10.714-68) провода марки ПЭТВ имеют нагревостойкость по классу В. Провода марки ПЭТ-155 (ГОСТ 21428-75) имеют несколько большую стойкость к тепловым ударам в сравнении с проводами марки ПЭТВ. Пропитанные лаками ПЭ933 и КО-916к (ТУ 6.02.690-72) провода марки ПЭТ-155 имеют нагревостойкость по классу F.

При выполнении обмоток путем механизированной укладки на статорообмоточных станках применяются эмалированные провода круглого поперечного сечения повышенной механической прочности марки ПЭТВМ (ТУ 16.505.370-72) класса нагревостойкости В и марки ПЭТМ (ТУ МИ 395-76) класса нагревостойкости F.

Все большее применение находят прямоугольные провода марок ПЭТВП (ГОСТ 17708-72) и ПЭТП-155 (ТУ МВ 505.265 74), заменяющие провода со стекловолокнистой изоляцией ПСД и ПСДТ. Для облегчения процесса изготовления катушечных обмоток статоров асинхронных двигателей размеры прямоугольных эмалированных проводов выбираются такими, чтобы отношение большей стороны к меньшей было не менее 2,0.

В настоящее время разработаны и осваиваются производством эмалированные провода с полиимидной изоляцией, рассчитанные для продолжительной работы при температуре 220°С. Такие провода смогут быть использованы для обмоток с классом нагревостойкости изоляции Н. Провода обладают высокой стойкостью к тепловым ударам, к растворителям и агрессивным средам, но недостатком их является пониженная стойкость к истиранию (в 2 раза ниже, чем у проводов марки ПЭТВ).

Применение прямоугольных эмалированных проводов для обмотки статора высоковольтных асинхронных двигателей требует покрытия их дополнительной двойной оплеткой из стекловолокна. В настоящее время для обмотки таких двигателей применяют провода марки ПЭТВСД (ТУ 16.505.816-75)

Для выводов электрических двигателей применяют кабели марок РКГМ — при нагревостойкости изоляции классов В, F и Н, а также ПАЛ-130 — при изоляции классов В и F. Все эти кабели обладают необходимой гибкостью благодаря применению медных жил, состоящих из тонких проволок, и эластичности изоляции.

Алюминий марки А5 (ГОСТ 11069-74) используют для заливки короткозамкнутых роторов, а для сварной беличьей клетки применяют прямоугольные прессованные шины из алюминия марки АД0 (ГОСТ 15176-70).

Для изготовления коллекторных пластин применяется специальная холоднокатаная коллекторная медь (ГОСТ 3568-70). Для коллекторов быстроходных двигателей может применяться кадмиевая медь (ГОСТ 4134-75), обладающая большей механической прочностью и меньшим износом на истирание в сравнении с холоднокатаной коллекторной медью.

7-3. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ

До недавнего времени отечественная металлургическая промышленность выпускала только горячекатаные электротехнические стали в листах стандартных размеров ограниченного сортамента. Уровень магнитных свойств этих сталей относительно невысок (ГОСТ 21427.3-75), невысоки и показатели, характеризующие состояние поверхности листов, их разнотолщинность, неплоскостность.

В начале 70-х годов разработаны и продолжают разрабатываться изотропные холоднокатаные электротехнические стали различной степени легирования, поставляемые в листах, рулонах и резаных лентах. Эти стали обладают высоким уровнем магнитных свойств, хорошим качеством поверхности, малыми разнотолщинностью неплоскостностью и позволяют существенно улучшить энергетические показатели и уменьшить массу электрических машин; коэффициент заполнения сердечника при применении этих сталей повышается примерно до 0,97.

Поставка холоднокатаных электротехнических сталей в рулонах и в резаных лентах позволяет внедрять на электромашиностроительных заводах автоматическую штамповку. Это ведет к значительному повышению производительности труда и к снижению на 10—15% отходов при штамповке.

Анализ основных характеристик электродвигателей в диапазоне мощностей примерно от 0,55 до 1000 кВт показывает, что отношение потерь в стали к сумме потерь при переходе от малых мощностей к большим постепенно возрастает.

В сериях асинхронных двигателей общего назначения это отношение при использовании электротехнической стали марки, принятой для данной серии или ее участка, практически не превышает 25—27%. Стали с удельными потерями $P_{1,0/50}$—2,5 Вт/кг целесообразно использовать в асинхронных двигателях приблизительно до 100 кВт при $2p=4$, а в двигателях постоянного тока до 200 кВт. При дальнейшем увеличении мощности двигателей и соответствующем повышении отношения потерь в стали к сумме потерь обычно осуществляется переход на сталь с меньшими удельными потерями. Таким образом и были установлены области применения электротехнических сталей с различными удельными потерями (см. § 14-2 и 17-1).

Холоднокатаная малоуглеродистая изотропная сталь марки 2013 (ГОСТ 21427.2-75) поставляется без термической обработки, так как из-за большой пластичности ее в отожженном состоянии штамповка листов сердечников электрических машин затруднена (образуются большие заусенцы). После штамповки листы сердечников подвергаются термической обработке в специальных печах в защитной атмосфере (при этом происходит дальнейшее обезуглероживание стали и стабилизация удельных потерь), а затем оксидированию в атмосфере водяного пара или воздуха для получения поверхностного изоляционного слоя.

Перспективным является освоение разработанной нелегированной стали с добавками фосфора, которая при уровне магнитной проницаемости не ниже стали марки 2013 позволит устранить необходимость специальной термической обработки после штамповки при сохранении только процесса оксидирования.

Изотропная сталь марок 2211, 2312 и 2411 (ГОСТ 21427.2-75) поставляется в термически обработанном состоянии; предусмотрен также выпуск этих марок стали с нагревостойким электроизоляционным покрытием, увеличивающим срок службы штампов.

Для шихтованных сердечников полюсов применяют холоднокатаную анизотропную электротехническую сталь марок 3411 или 3412 (ГОСТ 21427.1-75).

Изотропную холоднокатаную сталь толщиной 0,5 мм изготовляют в виде рулонов шириною 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм, резаных лент шириною 90, 95, 107, 123, 138, 140, 150, 156, 160, 170, 175, 187, 200, 215, 226, 233, 250, 260, 280, 300, 322, 325, 360, 400, 445 и 500 мм, а также листов размером 500×1500, 750×1500 и 1000×2000 мм.

Анизотропную холоднокатаную сталь толщиною 0,5 мм изготовляют в виде рулонов шириною 750, 860 и 1000 мм, резаных лент шириною 170, 180, 190, 200, 240, 250, 300, 325, 360, 400, 465 и 500 мм, а также листов размером 750×1500, 860×1500 и 1000×2000 мм.

Резаные ленты по соглашению потребителя с изготовителем допускается изготовлять другой ширины.

7-4. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В качестве основных конструкционных материалов в электродвигателях применяют чугун (литье), сталь (прокат, литье и поковки), алюминий и алюминиевые сплавы (литье), медь (прокат).

Литье из серого чугуна марок СЧ12-28 и СЧ15-32 (ГОСТ 1412-70) используют для станин асинхронных двигателей, подшипниковых щитов, втулок коллекторов, нажимных шайб якоря и ротора и других деталей, к которым не предъявляются требования высокой механической прочности. При повышенных требованиях к механической прочности для указанных деталей применяют литье из ковкого чугуна марки КЧ37-12.

Прокатаная сталь круглого поперечного сечения (ГОСТ 1050-74), главным образом марки 45, применяется для изготовления валов и втулок. Из тонкой листовой стали изготовляют кожухи наружных вентиляторов, защитные кожухи, распорки между пакетами сердечников и нажимными шайбами (нажимные пальцы), направляющие воздух щитки, детали вентиляторов. Из толстолистовой стали изготовляют станины и подшипниковые щиты асинхронных двигателей в сварном исполнении, а также станины двигателей постоянного тока; в последнем случае сталь выполняет роль как конструкционного, так и магнитопро-

водящего материала. Для изготовления станин двигателей постоянного тока с высотами оси вращения меньше 225 мм применяют также цельнотянутые стальные трубы.

Литая сталь марок 25Л и 35Л (ГОСТ 977-75) находит применение в коллекторных втулках и других деталях с высокими механическими нагрузками.

Стальные поковки применяют для изготовления коллекторных нажимных конусов и контактных колец фазных роторов.

Стальная луженая бандажная проволока применяется для бандажирования обмоток фазных роторов асинхронных двигателей и якорей двигателей постоянного тока. Проволока марки 50 — немагнитная и марки 70 — магнитная (ГОСТ 9124-59).

Алюминиевый литой сплав марок АЛ2 и АЛ9 (ГОСТ 2685-75) применяют для изготовления станин асинхронных двигателей, подшипниковых щитов, подшипниковых крышек и вентиляторов. Алюминиевые сплавы уменьшают массу двигателей и позволяют применить прогрессивный метод литья под давлением, при котором значительно уменьшается трудоемкость механической обработки деталей.

Латунь марки Л62 (ГОСТ 931-70) применяется для изготовления щеткодержателей, пальцев щеткодержателей, немагнитных рамок на полюсах двигателей постоянного тока.

Глава восьмая

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Народнохозяйственный экономический эффект от внедрения спроектированных двигателей определяется как эффективностью их производства на электромашиностроительных предприятиях, так и эффективностью использования их у потребителей. Эффективность производства двигателей зависит от уровня себестоимости и от дополнительных капитальных затрат, а эффективность при использовании двигателей у потребителей — от уровня эксплуатационных и сопутствующих капитальных затрат, а также от срока службы двигателей.

Принимая неизменными капитальные затраты на производство и эксплуатацию двигателей, а также сроки службы двигателей, критерием экономической эффективности вариантов спроектированных двигателей при температуре обмоток, не превышающей допускаемых пределов для изоляции данного класса нагревостойкости, следует считать минимум суммы затрат, которая определяется стоимостью двигателя и эксплуатационными расходами за установленный расчетный срок его службы до первого капитального ремонта.

Сумма затрат, руб. может быть выражена следующим образом:

для асинхронных двигателей

$$C=[1+t(k_п+k_о)](C_{дв}+C_р)+C_э; \quad (8\text{-}1)$$

для двигателей постоянного тока

$$C=[1+t(k_а+k_о)]C_{дв}+C_а, \tag{8-2}$$

где t — нормативный срок окупаемости, лет; $C_{дв}$ — себестоимость двигателя, руб.; $C_р$ — стоимость потерь реактивной энергии, руб.; $C_а$ — стоимость потерь активной энергии, руб.; $k_а$ — доля амортизационных отчислений; $k_о$ — доля затрат на обслуживание при эксплуатации двигатели.

При средних значениях t=5 лет, $k_а$=0,065, $k_о$=0,069 сумма затрат, руб., составит:

для асинхронных двигателей

$$C=1,67(C_{дв}+C_р)+C_а; \tag{8-3}$$

для двигателей постоянного тока

$$C=1,67C_{дв}+C_а. \tag{8-4}$$

При проектировании серии определение себестоимости двигателей путем подробной калькуляции нецелесообразно, так как в процессе освоения машин в производстве их конструкция и технологический процесс изготовления обычно дорабатываются и видоизменяются, что может соответственно повлиять на их себестоимость, поэтому при проектировании серий расчет себестоимости производят по укрупненным показателям, базирующимся на материалах подробной калькуляции аналогичных по назначению существующих двигателей.

Так как двигатели, охватываемые всей серией или ее отдельными участками, обладают общностью конструкции и технологии производства, а также закономерно изменяющимися электромагнитными нагрузками, то себестоимость таких двигателей подчиняется определенным зависимостям.

Себестоимость двигателя состоит из стоимости материалов и стоимости производства.

Материалы, применяемые в двигателях, можно разделить на следующие основные группы:

1) проводниковые материалы (обмоточные провода, коллекторная медь, алюминий короткозамкнутого ротора и т. д.);

2) магнитные материалы;

3) изоляционные материалы;

4) конструкционные материалы.

Массу проводниковых, магнитных и изоляционных материалов определяют при расчете двигателя, причем стоимость этих групп материалов является определяющей, так как составляет в среднем у асинхронных двигателей 70%, а у двигателей постоянного тока 75% общей стоимости материалов.

Масса конструкционных материалов, кг, может быть представлена для серии двигателей в следующем виде:

$$G_к=G_{к1}+G_{к2}, \tag{8-5}$$

где $G_{к1}$ — масса конструкционных материалов, зависящая от длины сердечника статора или якоря (у асинхронных двигателей это часть вала и станины, а у двигателей постоянного тока — только часть вала, так как станина входит в группу магнитных материалов); $G_{к2}$ — масса кон-

струкционных материалов, не зависящая от длины сердечников (у асинхронных двигателей это подшипниковые щиты с подшипниковым узлом, вводное устройство, части вала и станины, расположенные за пределами длины сердечника, вентилятор, узел контактных колец; у двигателей постоянного тока — подшипниковые щиты с подшипниковым узлом, вводное устройство, часть вала, расположенная за пределами длины сердечника, вентилятор, крепежные детали коллектора).

Для серии двигателей составляющие массы конструкционных материалов, кг, могут быть выражены следующими уравнениями:

$$G^*_{\text{к1}}=k_1 l D^2_{\text{н1}}; \tag{8-6}$$

$$G_{\text{к2}}=k_2 D^x_{\text{н1}}, \tag{8-7}$$

где $D_{\text{н1}}$ — наружный диаметр сердечника статора; l—длина сердечника, мм; k_1, k_2 — коэффициенты, x — показатель степени, зависящий от конструкции и материалов двигателя.

Для приближенного определения $G_{\text{к1}}$ и $G_{\text{к2}}$ при проектировании серии k_1 и k_2 можно принять в соответствии с рекомендациями § 14-17 для асинхронных двигателей и § 17-18 для двигателей постоянного тока.

Стоимость производства двигателя включает в себя как заработную плату, так и накладные расходы (цеховые, общезаводские и внепроизводственные), определяемые организацией производства, уровнем механизации и автоматизации, а также масштабами выпуска однотипных двигателей.

Накладные расходы колеблются в довольно значительных пределах. Средние значения этих расходов по отношению к основной зарплате составляют 300% для двигателей с $h\leq 160$ мм и 500% — для двигателей с $h>160$ мм.

В то время как стоимость материалов растет пропорционально их массе, стоимость производства, руб., растет медленнее и может быть выражена эмпирической формулой

$$C_{\text{пр}}=k_{\text{пр1}} D^3_{\text{н1}} (k_{\text{пр2}}+l/D_{\text{н1}}), \tag{8-8}$$

где $k_{\text{пр1}}$ и $k_{\text{пр2}}$ - коэффициенты, зависящие от уровня технологического процесса, совершенства оборудования и организации производства.

Для приближенного определения $C_{\text{пр}}$ при проектировании серии коэффициент $k_{\text{пр1}}$ может быть принят равным $5\cdot10^{-4}$ для асинхронных двигателей, а для двигателей постоянного тока в зависимости от высоты оси вращения

h, мм	До 200	225—315	355—500
$k_{\text{пр1}}$	$7{,}5\cdot10^{-4}$	$11\cdot10^{-4}$	$14\cdot10^{-4}$

Коэффициент $k_{\text{пр2}}$ принимается равным 0,4.

К эксплуатационным расходам относят затраты на потери электроэнергии и обслуживание двигателя. Бо́льшая часть расходов приходится на потери электроэнергии; эти расходы за расчетный срок службы могут в несколько раз превышать стоимость двигателя.

Стоимость потерь активной энергии в двигателе, руб., при заданном среднем коэффициенте загрузки двигателя и потерь в распределитель-

* Здесь и далее все обозначения параметров и размеров машин приняты в соответствии с ОСТ.ОАА.619.005 69 (Минэлектротехпром СССР).

ной сети потребителя, включая понижающий трансформатор (до счетчика энергии),

$$C_а=c_а h t k_з (P_2/\eta_з)(1+a-\eta_з), \qquad (8\text{-}9)$$

где $c_а$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.; h — продолжительность работы за год, ч; t — нормативный срок окупаемости, лет; $k_з$ — принятый средний коэффициент загрузки двигателя; $\eta_з$ — к. п. д. при среднем коэффициенте загрузки; P_2 — номинальная мощность, кВт; a — потери в распределительной сети, отнесенные к потребляемой мощности двигателя.

Как показывает практика выбора и эксплуатации двигателей, средний коэффициент их загрузки повышается с увеличением номинальной мощности. С достаточным приближением можно принять, что средний коэффициент загрузки двигателей по мощности с $h\leq 250$ мм составляет 0,6; для двигателей с $h>250$ мм — 0,75.

При средних значениях $c_а=0{,}013$ руб/(кВт·ч), $h=1500$ ч, $t=5$ лет, $a=0{,}04$ стоимость потерь активной энергии, руб.,

$$C_а=68{,}5(P_2/\eta_з)(1{,}04-\eta_з). \qquad (8\text{-}10)$$

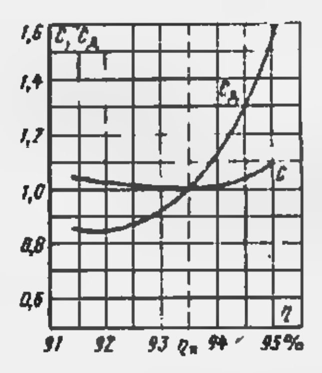


Рис. 8-1. Зависимости себестоимости двигателя от к. п. д. $[C_д=f(\eta)]$ и суммы затрат от к. п. д. $[C=f(\eta)]$ для асинхронного двигателя мощностью 110 кВт, $2p=4$ и изоляции класса нагревостойкости В.

Стоимость потерь реактивной энергии, руб.,

$$C_р=c_р k_{м.у} k_з (P_2/\eta_з)(\operatorname{tg}\varphi_з-\operatorname{tg}\varphi_0), \qquad (8\text{-}11)$$

где $c_р$ — стоимость 1 кВ·А реактивной мощности компенсирующих устройств, руб.; $k_{м.у}$ — коэффициент участия двигателя в максимумах нагрузки; $\operatorname{tg}\varphi_з$ — тангенс, соответствующий коэффициенту мощности при принятом коэффициенте загрузки; $\operatorname{tg}\varphi_0$ тангенс, соответствующий коэффициенту мощности (принят 0,9), при котором потребляемая реактивная энергия не требует дополнительной оплаты ($\operatorname{tg}\varphi_0=0{,}484$).

При средних значениях $c_р=13{,}5$ руб/квар; $k_{м.у}=0{,}25$, $\operatorname{tg}\varphi_0=0{,}484$ стоимость потерь реактивной энергии, руб.,

$$C_р=2{,}36(P_2/\eta_з)(\operatorname{tg}\varphi_з-0{,}484). \qquad (8\text{-}12)$$

Следует отметить, что зависимость суммы затрат от массы двигателя или его к. п. д. носит в зоне оптимальных значений пологий характер (рис. 8-1), что создает достаточную свободу в выборе размеров активной части и соответственно расхода активных материалов при проектировании двигателей.

Глава девятая

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

9-1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В современной практике электромашиностроения асинхронные двигатели изготовляются с оболочками из алюминиевых сплавов, чугуна или сварными из стального проката и листовой стали; двигатели постоянного тока — со станиной из стали и подшипниковыми щитами из алюминиевых сплавов или со станиной из стали и подшипниковыми щитами из чугуна.

Учитывая многолетний опыт эксплуатации двигателей с оболочками (станиной и подшипниковыми щитами) из алюминиевых сплавов в Советском Союзе, следует считать, что изготовление таких двигателей целесообразно для высот оси вращения не более 63 мм (рис. 9-1). С увеличением размеров двигателей, имеющих алюминиевые щиты и станины, начинают в значительной степени сказываться недостатки такой конструкции: невысокая механическая прочность, возможность деформации отдельных элементов, значительная деформация внутренней поверхности сердечника статора при обливке его алюминиевым сплавом, недостаточная жесткость подшипниковых щитов, приводящая к потере симметрии воздушного зазора, особенно после повторных разборок и сборок двигателей.

Для устранения недостаточной жесткости подшипниковых щитов в двигателях с высотами оси вращения 71—100 мм применяется комбинированная конструкция двигателей — станина из алюминиевого сплава, подшипниковые щиты из чугуна. Шведская фирма АСЕА, выпускающая двигатели с оболочкой из алюминиевого сплава до высоты оси вращения 225 мм, применяет в подшипниковых щитах заливку стальных втулок под посадку подшипников качения.

Все более широкое применение в практике электромашиностроения находит выполнение станин из полого профиля, получаемого путем экструзии из алюминиевого сплава в виде трубы с наружной конфигурацией охлаждающих ребер, лап, площадки для установки коробки выводов и т. д., которая разрезается на отдельные заготовки; такие станины отличаются повышенной механической прочностью и высокой технологичностью; они применимы для двигателей с высотами оси вращения примерно до 112—132 мм.

Наибольшее распространение в мировой практике электромашиностроения получили асинхронные двигатели с литыми чугунными оболочками (рис. 9-2,*а* и *б*). Такие конструкции обеспечивают высокую надежность двигателей благодаря достаточной механической прочности материала станин и щитов, стабильности размеров деталей при сборочных операциях и коррозионной стойкости чугуна. Конструкции двигателей с чугунными оболочками обладают необходимой для массового производства технологичностью. Успехи последних лет в области чугунного литья и в области обработки резанием позволяют создавать высокомеханизированное технологическое оборудование (линии литья, автоматические линии обработки резанием и агрегатные станки). Область применения в сериях конструкций двигателей с чугунными оболочками

распространяется обычно до высоты оси вращения 280 мм и частично до высоты 560—630 мм наряду со сварными конструкциями. С чугунными станинами и щитами могут выполняться также двигатели малых высот (от 56 мм) оси вращения — специального исполнения для морского флота и сельского хозяйства, а также двигатели с высотами оси вращения 71—100 мм в виде основного исполнения наряду с двигателями со станинами из алюминиевого сплава.

Асинхронные двигатели со сварными оболочками из стального проката и листовой стали не нашли большого распространения для высот оси вращения менее 280 мм из-за недостаточной технологичности конструкции. Сварные конструкции достаточно широко применяются для двигателей начиная с высоты оси вращения 280 мм.

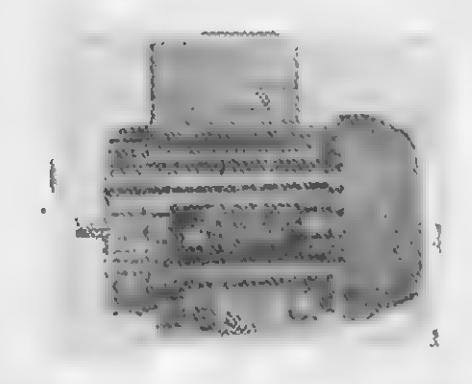


Рис. 9-1. Асинхронный двигатель с оболочкой из алюминиевого сплава.





Рис. 9-2. Асинхронные двигатели с чугунной оболочкой

а — степень защиты IP44; б — степень защиты IP23.

Двигатели постоянного тока с подшипниковыми щитами из алюминиевых сплавов могут выполняться до высоты оси вращения 132 мм. При этом в щитах предусматриваются стальные втулки под посадку подшипников. Станины выполняются из цельнотянутых стальных труб (для устранения необходимости применения сварных швов, вредно влияющих на распределение магнитного потока). Такое выполнение станин целесообразно для двигателей с высотами оси вращения примерно до 200 мм; однако перспективным является применение станин из цельнотянутых труб и для двигателей с бо́льшими высотами оси вращения.

Двигатели постоянного тока с высотами оси вращения более 132 мм выполняются с чугунными подшипниковыми щитами. При этом для дви-

гателей с высотами оси вращения свыше 200 мм станины свариваются из толстолистовой стали, свернутой в трубу на роликах. Стальное литье для станин, как правило, не применяется.

Как уже указывалось в гл. 3, электродвигатели общего назначения имеют только два исполнения по степени защиты IP44 и IP23 (для двигателей постоянного тока IP22).

Машины обоих исполнений образуют в серии два самостоятельных ряда, существенно различающихся принципиальной конструкцией, но тесно связанных унификацией активных и конструкционных частей, а также общностью технологических процессов.

В сериях асинхронных двигателей, особенно на участках, соответствующих массовому производству, основным конструктивным исполнением является исполнение по степени защиты IP44. Это исполнение для двигателей с высотами оси вращения 132 мм и менее является обычно единственным.

Отказ от выпуска двигателей указанного участка в исполнении со степенью защиты IP23 целесообразен, так как в результате этого резко повышается массовость выпуска однотипных изделий со всеми технологическими преимуществами и обеспечивается существенное повышение надежности двигателей.

Асинхронные двигатели в исполнении IP23 выпускаются обычно начиная с высоты оси вращения 160 мм. При этом обеспечивается полная унификация их с двигателями исполнения IP44 по геометрии активной зоны (листы статора и ротора) и по установочным размерам, но с соответствующим повышением мощности. Для двигателей с высотами оси вращения свыше 250 мм основным исполнением по степени защиты является уже исполнение IP23, а исполнение IP44 — как бы производным от него. Объясняется это тем, что в данном диапазоне высот оси вращения объем выпуска двигателей в исполнении IP44 существенно меньше, чем двигателей в исполнении IP23.

В сериях двигателей постоянного тока обычно имеют место оба исполнения по степени защиты — IP44 и IP22 во всем диапазоне высот оси вращения, так как двигатели постоянного тока не обладают столь большой массовостью выпуска, как асинхронные двигатели, и специфика их применения по условиям окружающей среды более строго учитывается в области электропривода.

Асинхронные двигатели в исполнении IP44 на участке высот оси вращения примерно до 280 мм имеют у всех современных серий практически одинаковую принципиальную конструкцию (рис. 9-3): оребренную станину (рис. 9-3,*а*), а в ряде случаев и оребренные подшипниковые щиты; наружный вентилятор, насаженный на конец вала, противоположный выступающему концу и закрытый направляющим воздух кожухом. На участке высот оси вращения 280—355 мм в дополнение к обдуву оребренного корпуса иногда предусматривается охлаждение сердечника ротора наружным воздухом (рис. 9-3,*б*) через аксиальные вентиляционные каналы под действием лопаток, расположенных на внутренней стороне диска вентилятора (например, у двигателей серии 4А). В конструкции двигателей исполнения IP44 на участке высот оси вращения более 400 мм ребристые станины и подшипниковые щиты обычно не применяются; сварная станина снабжается либо вваренными по всей окружности стальными трубами для прохода охлаждающего воздуха под действием наружного вентилятора (рис. 9-3,*в*), либо устройством для размещения сосредоточенного трубчатого охладителя; при этом воздушный охладитель может быть легко заменен водяным.

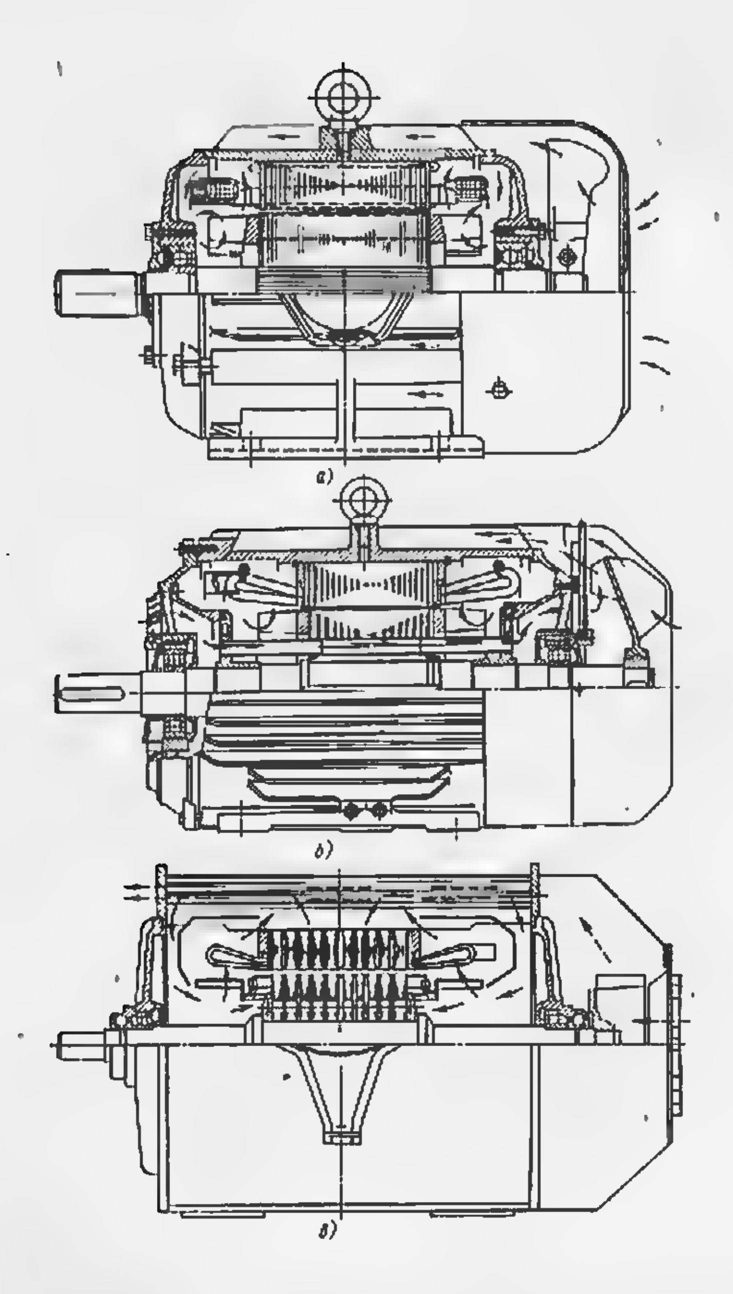


Рис. 9-3. Принципиальные конструкции асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 и схемы движения охлаждающего воздуха при различных способах охлаждения. *а* — IC0141; *б* — IC0141 (с продуваемым ротором); *в* — IC0151 (с распределенным воздухо-воздушным охладителем)

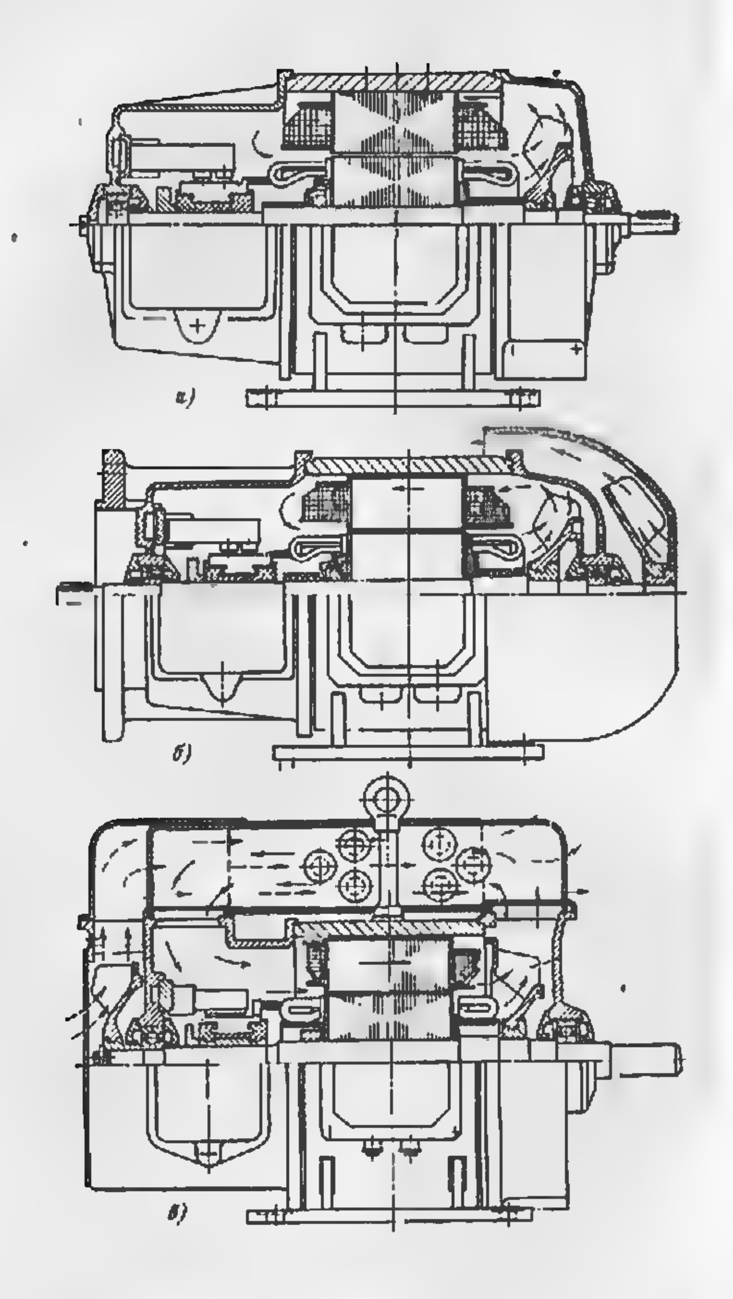


Рис. 9-4. Принципиальные конструкции двигателей постоянного тока со степенью защиты IP44 и схемы движения охлаждающего воздуха при различных способах охлаждения.

а — IC0041; *б* — IC0141; *в* — IC0151 (с воздухо-воздушным охладителем).

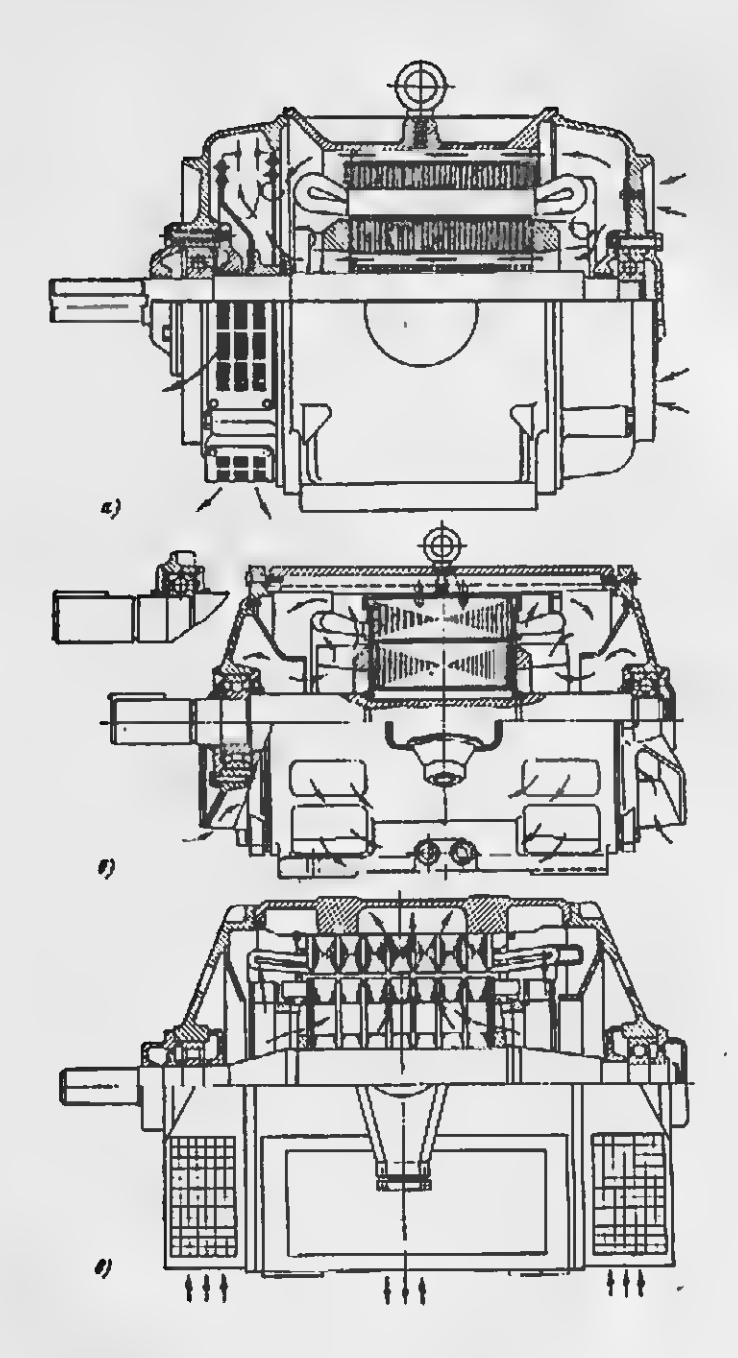


Рис. 9-5. Принципиальные конструкции асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 и схемы движения охлаждающего воздуха при способе охлаждения IC01.

а — с аксиальной системой вентиляции; *б* — с радиальной системой вентиляции без вентиляционных каналов, *в* — с радиальной системой вентиляции с вентиляционными каналами.

Двигатели постоянного тока в исполнении по степени защиты IP44 имеют в диапазоне высот оси вращения примерно до 200 мм конструкцию либо с естественным охлаждением (рис. 9-4,*а*), либо с обдувом наружным вентилятором (рис. 9-4,*б*) аналогично асинхронным двигателям; однако при этом оребрение станины и подшипниковых щитов обычно не применяется. У двигателей с высотами оси вращения 225—315 мм предусматривается в конструкции сосредоточенный воздухо-воздушный охладитель (рис. 9-4,*в*) или же устраивается система подвода и отвода воздуха по трубам для независимой вентиляции. В двигателях с высотами оси вращения 355—560 мм предусматривается независимая вентиляция.

Конструкция асинхронных двигателей в исполнении IP23 обычно предусматривает либо аксиальную систему вентиляции с входом охлаждающего воздуха со стороны одного из подшипниковых щитов и выходом под действием внутреннего вентилятора со стороны другого подшипникового щита (рис. 9-5,*а*), либо радиальную систему вентиляции с входом охлаждающего воздуха со стороны обоих щитов (под действием лопаток, расположенных на торцах обмотки ротора, или отдельных вентиляторов) и выходом его через отверстия в станине (рис. 9-5,*б* и *в*).

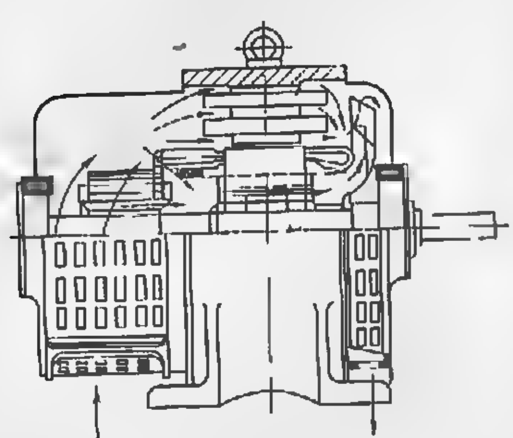


Рис. 9-6. Принципиальная конструкция двигателя постоянного тока со степенью защиты IP22 и схема движения охлаждающего воздуха при способе охлаждения IC01.

Отверстия для входа и выхода воздуха закрываются специальными жалюзи, учитывающими требования, предъявляемые к степени защиты IP23. Конструкция двигателей с двусторонней симметричной радиальной системой вентиляции признана наиболее рациональной для отечественных серий двигателей исполнения IP23 во всем диапазоне высот оси вращения — от 160 до 560 мм (см. § 3-2). В современной зарубежной практике встречается применение обеих систем вентиляции — аксиальной и радиальной.

Конструкция двигателей постоянного тока в исполнении IP22 (рис. 9-6) предусматривает аксиальную систему вентиляции как наиболее рациональную в силу специфических конструктивных особенностей машин постоянного тока (сплошная станина-магнитопровод с расположенными в ней полюсами, наличие коллектора и связанных с ним устройств). Аксиальная система вентиляции позволяет сравнительно просто переходить от исполнения IP22 к исполнению IP44 установкой труб для подвода и отвода охлаждающего воздуха при независимой системе вентиляции.

В отечественных и зарубежных конструкциях электродвигателей последних лет наблюдается явная тенденция перехода от круглых внешних очертаний электродвигателей к прямоугольным (см., например, рис. 9-2,*б*). Прямоугольная форма внешних очертаний считается более эстетичной, чем круглая, так как она лучше вписывается в интерьер производственных помещений, гармонируя с прямыми линиями колонн,

перекрытий, мостовых кранов, станков, окон, систем искусственного освещения и т. д. Корпуса двигателей со степенью защиты IP44 с внешним обдувом имеют ребра переменной высоты, чем достигается форма, близкая к прямоугольной (рис. 9-7).

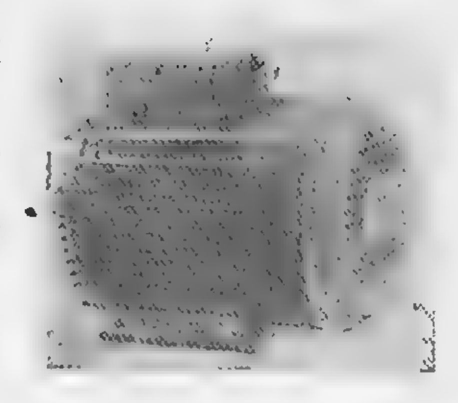


Рис. 9-7. Асинхронный двигатель шведской фирмы АСЕА с формой внешних очертаний, близкой к прямоугольной.

У двигателей со степенью защиты IP23 применение прямоугольных станин позволяет существенно увеличить наружный диаметр сердечника статора $D_{н1}$ и повысить использование внутреннего объема машины при данной высоте оси вращения без сужения путей для охлаждающего воздуха либо перейти на меньшую высоту оси вращения (h' на рис. 9-8).

Перспективной является так называемая блочная конструкция двигателей, при которой блоки механической и электрической части изготовляются независимо, на отдельных технологических потоках, и объединяются только при окончательной сборке машины. Блочная конструкция предоставляет широкие возможности для унификации деталей и сборочных единиц двигателей различных исполнений по степени защиты и по способам охлаждения (рис. 9-9). Такого рода конструкции приобретают в настоящее время за рубежом все большее распространение для двигателей с высотами оси вращения 280 мм и более.

В отечественной практике последних лет применяется блочная конструкция асинхронных двигателей с прямоугольной формой внешних очертаний и с коробчатой станиной, охватывающей сердечник статора не по всей его окружности, а только в нижней части (половину окружности или меньше). Сверху двигатель закрывается кожухом из листовой стали.

Подобная конструкция реализована в сериях асинхронных двигателей: низковольтных 4АН — 4АНК при h=280÷355 мм (рис. 9-10,*а*) и высоковольтных А2 — АК2 и АО2 — АОК2 при h=450÷560 мм (рис. 9-10,*б* и *в*).

В основе конструкции низковольтных двигателей 4АН — 4АНК (рис. 9-10,*а*) — сварная полустанина, литые, чугунные или стальные сварные подшипниковые щиты, опирающиеся своей нижней частью на заточку станины. Отдельно изготовляемый сердечник статора с обмоткой, несущий на себе также и вводное устройство, укладывается при сборке двигателя в заточки на внутренних ребрах полустанины, а кожух из листовой стали закрывает двигатель сверху. Эта конструкция дает возможность просто и надежно выполнять обмотку статора (вне станины) с применением пропитки в современных составах без растворителей; уход и профилактика сильно упрощаются: для осмотра и очистки достаточно снять кожух (рис. 9-11), при ремонтах

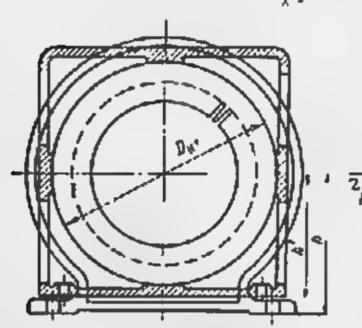


Рис. 9-8. Использование внутреннего объема в конструкциях двигателей с круглой и прямоугольной станиной.

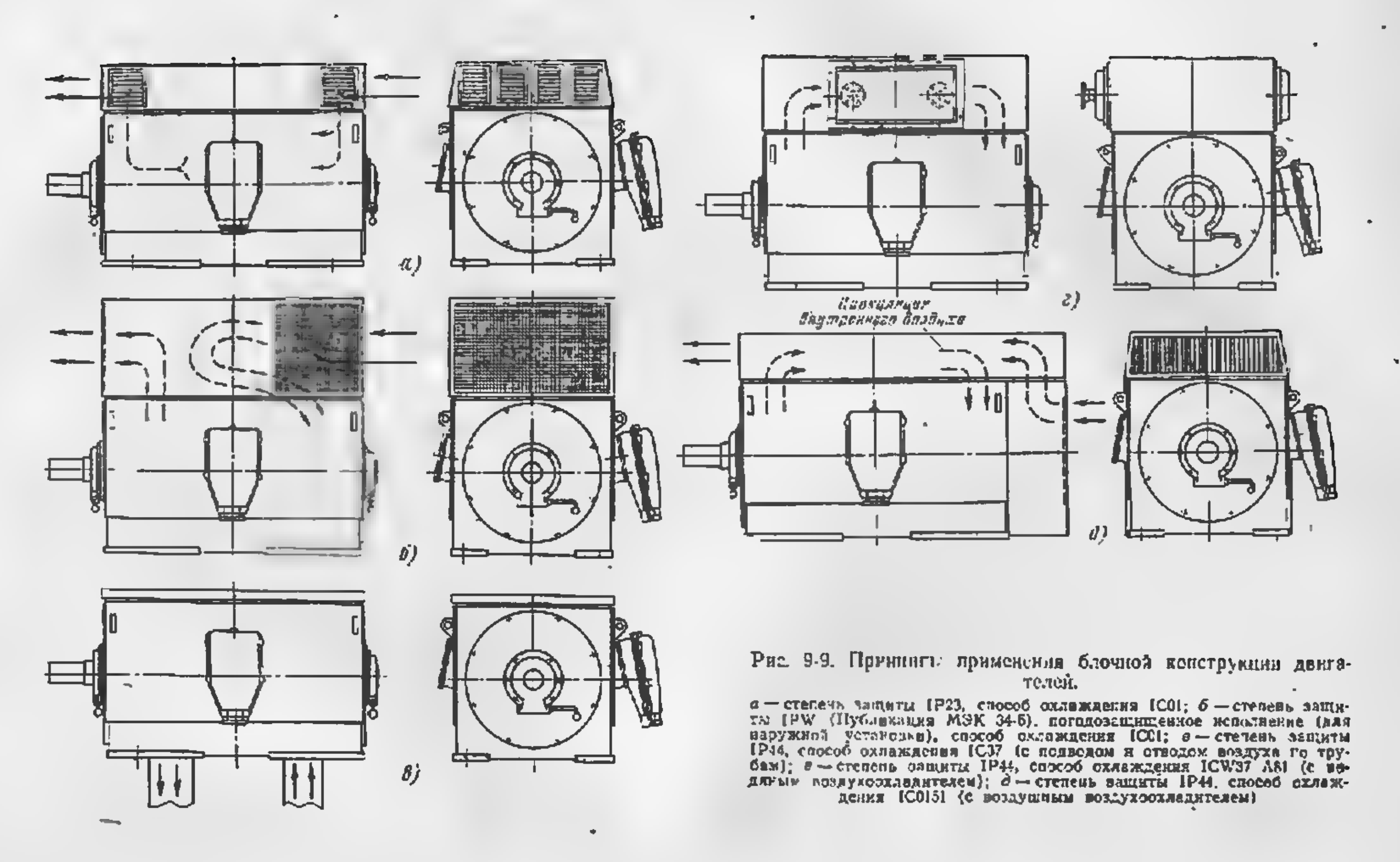


Рис. 9-9. Принцип применения блочной конструкции двигателей.

а — степень защиты IP23, способ охлаждения IC01; б — степень защиты IPW (Публикация МЭК 34-5), погодозащищенное исполнение (для наружной установки), способ охлаждения IC01; в — степень защиты IP44, способ охлаждения IC37 (с подводом и отводом воздуха по трубам); г — степень защиты IP44, способ охлаждения ICW37 A81 (с водяным воздухоохладителем); д — степень защиты IP44, способ охлаждения IC0151 (с воздушным воздухоохладителем)

обмоток нет надобности снимать двигатель с фундамента (нарушать центровку с механизмом).

В основе конструкции высоковольтных двигателей А2—АК2 и АО2—АОК2 (рис. 9-10,*б* и *в*) — литая чугунная коробчатая станина, в известной степени аналогичная фундаментной плите крупных индивидуальных машин, опирающиеся на нее стояковые подшипники качения и отдельно изготовляемый сердечник статора с обмоткой, сварной кожух из листовой стали, закрывающий двигатель сверху и несущий на себе вводное устройство. Двигатели АО2—АОК2 со степенью защиты IP44 (рис. 9-10,*в*) имеют в верхней части кожуха сосредоточенный трубчатый воздушный охладитель. Электромагнитная часть двигателей обоих исполнений по степени защиты полностью унифицирована. Для полу-

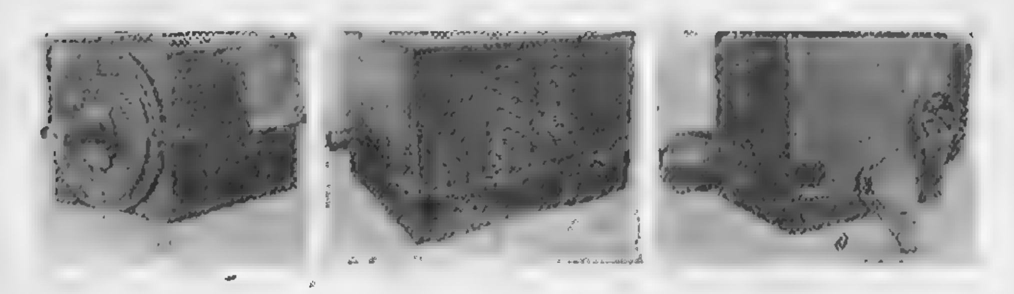


Рис. 9-10. Блочная конструкция асинхронного двигателя с коробчатой станиной и различными высотами оси вращения.

а — серия 4АН, $h=280 \div 355$ мм (исполнение IP23); *б* — серия А2, $h=450 \div 560$ мм (исполнение IP23); *в* — серия АО2, $h=450 \div 560$ мм (исполнение IP44)

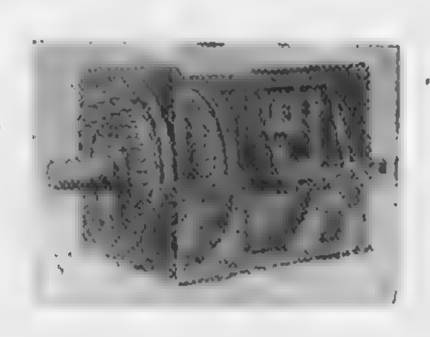


Рис. 9-11. Двигатель серии 4АН со снятым кожухом.

чения исполнения IP44 из исполнения IP23 достаточно заменить кожух, не имеющий охладителя, на кожух с охладителем и установить вентилятор (для этого должен быть предусмотрен соответствующий конец вала). При этом мощность двигателя со степенью защиты IP44 снижают на одну ступень шкалы по сравнению с мощностью исходного двигателя со степенью защиты IP23.

Некоторые зарубежные фирмы, например одно из предприятий ЧССР и датская фирма «Триге-Титан», приступили к выпуску двигателей так называемой неразборной конструкции (рис. 9-12). Эти двигатели имеют существенно уменьшенную трудоемкость изготовления за счет значительного упрощения технологических процессов и являются поэтому весьма рентабельными в массовом производстве. Ввиду малой стоимости таких двигателей ремонт их нецелесообразен, так как стоимость ремонта превышает стоимость нового двигателя.

При неразборной конструкции обмотанный сердечник статора запрессовывается в корпус, имеющий либо форму цилиндра, сваренного из листовой стали, либо форму стакана, полученного глубокой вытяж-

кой, или же применяется станина, получаемая методом экструзии из алюминиевого сплава. Простой формы штампованные или литые подшипниковые щиты крепятся к станине либо сваркой, либо быстро отверждающимся механически прочным клеем. Центровка ротора относительно внутренней поверхности статора осуществляется тремя симметрично расположенными стальными щупами-прокладками (через

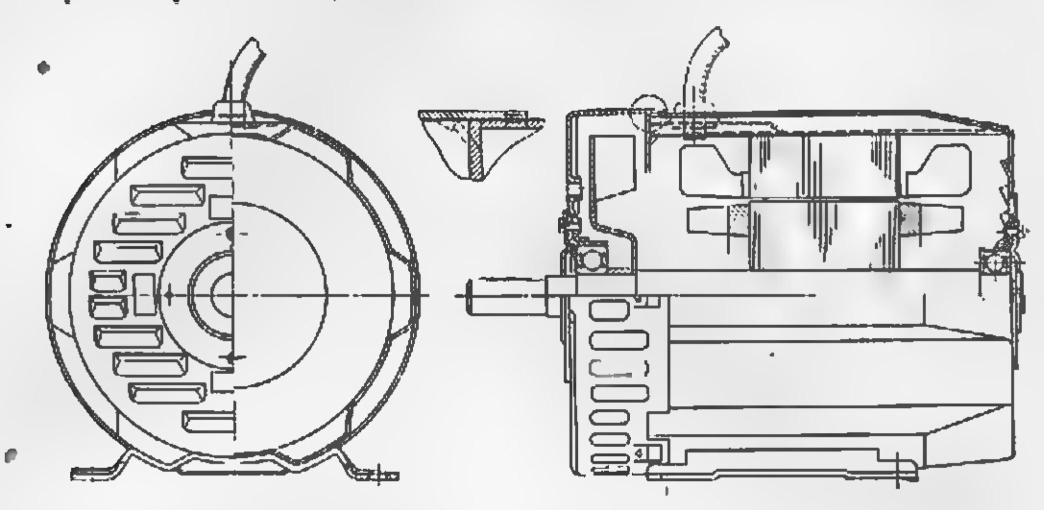


Рис. 9-12. Асинхронный двигатель неразборной конструкции фирмы «Триге-Титан».

специальные отверстия в щитах); щупы-прокладки удаляются после закрепления подшипниковых щитов. Надежность таких двигателей может быть существенно повышена капсулированием лобовых частей обмотки статора специальными компаундами с высокой теплопроводностью. Предельными высотами оси вращения для двигателей неразборной конструкции следует считать примерно 90—100 мм.

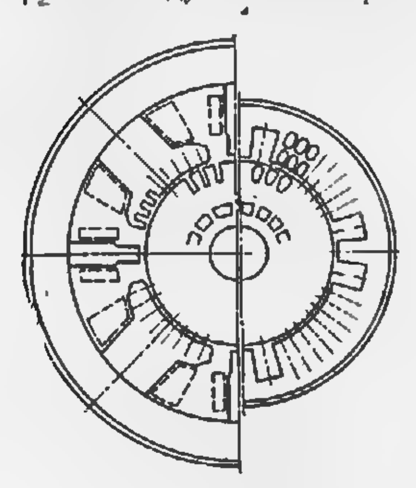


Рис. 9-13. Сравнение использования внутреннего пространства и размеров двигателей (слева — с массивной станиной и выступающими полюсами; справа — с шихтованным сердечником статора).

Одним из перспективных направлений в дальнейшем развитии конструкции и технологии изготовления двигателей постоянного тока являются принципы, заложенные фирмой «Сименс» (ФРГ) в новые серии 1G3, 1H3 и 1H4 с высотами оси вращения 112—315 мм [Л. 28, 29]. В отличие от шихтованной станины с привернутыми полюсами, предусмотренной в двигателях серии 2П с высотами оси вращения 400—500 мм, двигатели фирмы «Сименс» имеют, подобно тяговым электродвигателям или электромашинным усилителям, шихтованные сердечники статора с выштампованными в них пазами для размещения обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов, а также компенсационной обмотки. Увеличение трудоемкости изготовления таких двигателей вполне компенсируется преимуществами их конструкции, допускающей питание от трехфазной мосто-

вой схемы при отсутствии сглаживающих дросселей. В отличие от обычных двигателей с массивной станиной в них отсутствует демпфирующее действие вихревых токов и обеспечивается возможность работы при повышенных частотах вращения и с высокими скоростями изменения тока якоря; последнее особенно важно для приводов, требующих малых перемещений.

В сравнении с существовавшей ранее серией новые двигатели фирмы «Сименс» имеют при одной и той же высоте оси вращения значительно большую мощность и меньший динамический момент инерции якоря, что достигается лучшим использованием пространства внутри статора, применением для обмоток якоря и статора эмалированных проводов класса нагревостойкости F, значительным увеличением отношения $\lambda = l_2 / D_{н2}$.

На рис. 9-13 приведено сравнение при одном и том же диаметре якоря размеров двигателей старой конструкции с массивной станиной и выступающими полюсами и двигателей новой серии 1G3 с шихтованным сердечником статора. Принятая конструкция сердечника статора с чугунным корпусом дает возможность использовать основные механические детали и сборочные единицы — корпус статора с охлаждающими ребрами, лапы, подшипниковые щиты, вентилятор, кожух вентилятора, подшипники, применяемые в серии асинхронных двигателей с фазным ротором.

Двигатели с $h \leq 315$ мм с шихтованной станиной выпускаются в настоящее время также рядом иностранных фирм.

9-2. ТЕХНОЛОГИЯ, МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

Конструкция и технология изготовления электродвигателей общего назначения, особенно массового и крупносерийного выпуска, тесно связаны между собой. В конструкцию машины при ее проектировании должны быть заранее заложены принципы максимальной технологичности, т. е. возможности наиболее простого и дешевого изготовления деталей и узлов с широким применением последних достижений техники в области механизации и автоматизации технологических процессов, поэтому проектирование двигателей общего назначения, ориентированных на массовый и серийный выпуск, должно вестись совместно конструкторами и технологами.

При конструировании двигателей на надлежащем технологическом уровне следует учитывать не только дальнейшее усовершенствование их активной части, т. е. повышение использования, улучшение энергетических и пусковых характеристик, увеличение надежности и т. д., но и возможности максимального уменьшения материалоемкости сборочных единиц и деталей без ущерба их прочности в эксплуатации. В этом вопросе могут возникать противоречия между требованиями конструкции и технологии. Тогда либо принимается окончательное решение на основе технико-экономических соображений, либо ведутся дальнейшие поиски в области технологии.

Одним из ярких примеров таких противоречий является способ изготовления литых чугунных станин и подшипниковых щитов для наиболее массовых по выпуску асинхронных двигателей с высотами оси вращения до 132 мм. В современных освоенных в производстве отечественных единых сериях асинхронных двигателей (А2-АО2, 4А) чугунные станины и подшипниковые щиты выполняются литьем в песча-

ные формы. При формовке станин применяется аксиальный разъем форм, что требует наличия по всей длине станины трех или четырех утолщенных ребер, в торцах которых сверлятся и нарезаются отверстия для крепления болтами подшипниковых щитов, а также соблюдения определенных литейных уклонов в теле станины и ребрах (рис. 9-14,*а*; здесь литейные уклоны для наглядности несколько утрированы). Подшипниковые щиты выполняются при литье утолщенными, с большими припусками на обработку. Все это приводит к повышению расхода металла как в отливках, так и в обработанных изделиях и увеличивает трудоемкость механической обработки.

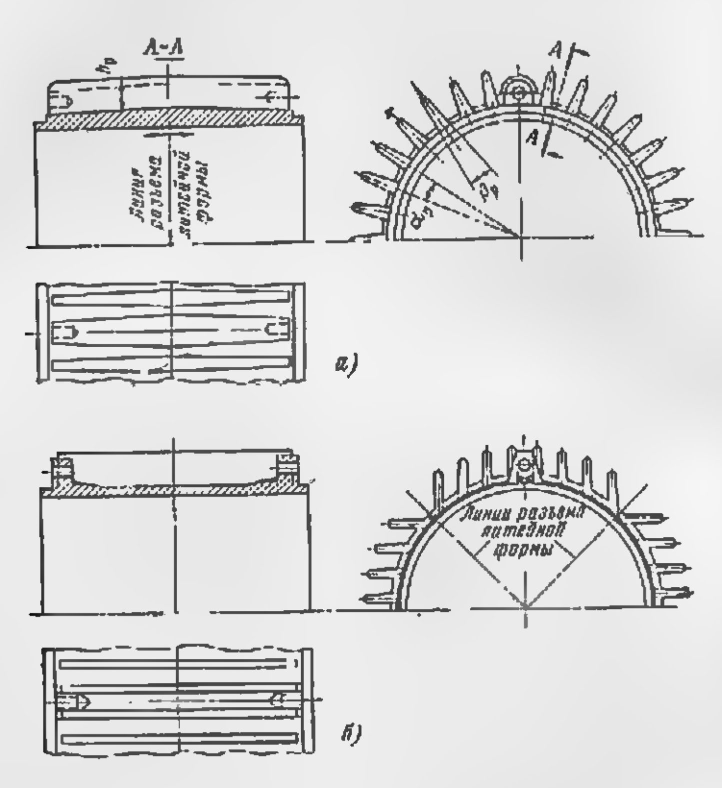


Рис 9-14. Принципиальная конструкция чугунной станины асинхронного двигателя.
а — для литья в песчаную форму с аксиальным разъемом, *б* — для литья в металлический кокиль с четырехсторонним радиальным разъемом.

В последние годы получает довольно широкое распространение чугунное литье в металлические кокили. При этом способе литья целесообразно применение четырехстороннего радиального разъема форм при отливке станин (рис. 9-14,*б*) вместо общепринятого аксиального. Это дает экономию в расходе чугуна (на 10—15%) за счет замены утолщенных ребер ушками, устранения аксиальных формовочных уклонов и уменьшения толщины станины в месте посадки сердечника статора. Одновременно за счет уменьшения в отливках припусков на механическую обработку, повышения точности геометрических размеров, снижения твердости (отжиг) трудоемкость механической обработки станин и щитов существенно снижается при значительном улучшении

товарного вида двигателей. Однако всем этим преимуществам способа литья в металлические кокили противостоит его недостаточная производительность по сравнению с производительностью современных автоматических линий формовки и литья (например, линий с пескодувно-прессовой формовкой).

Поскольку конструкция станины, отливаемой в металлические кокили с четырехсторонним радиальным разъемом (рис. 9-14,*б*), имеет ряд указанных выше существенных преимуществ по сравнению с конструкцией станины, отливаемой в песчаные формы с аксиальным разъемом (рис. 9-14,*а*), то перед технологами-литейщиками при создании будущих перспективных серий встает задача: либо обеспечить такой способ формовки для литья в песчаные формы, который давал бы отливки, аналогичные отливкам при четырехстороннем разъеме форм, либо путем изыскания ряда дополнительных мероприятий существенно повысить производительность литья в металлические кокили.

При разработке конструкции двигателей массового и серийного производства уделяется большое внимание унификации сборочных единиц и деталей, таких, например, как подшипниковые щиты, подшипники, крышки подшипников, валы, коллекторы, щетки, щеткодержатели, вводные устройства и т. п. Это уменьшает номенклатуру и увеличивает количество одинаковых изделий в партиях, что весьма благоприятно сказывается на повышении показателей технологичности конструкций. Одноименные детали двигателей соседних высот оси вращения или даже соседних участков серии должны иметь принципиально одинаковую конструкцию для облегчения перестройки автоматических поточных линий и агрегатных станков.

Современное производство электродвигателей общего назначения, особенно в части массового и серийного выпуска, характеризуется применением широкой механизации и автоматизации технологических процессов. Эта область технологии продолжает быстрыми темпами развиваться, появляются все новые и новые станки-автоматы, полностью устраняющие применение даже незначительных ручных операций и отличающиеся особо высокой производительностью.

Например, в области массового производства асинхронных двигателей (при $h \leqslant 132$ мм) можно отметить уже достигнутую или вполне реальную в перспективе механизацию и автоматизацию следующих технологических операций:

последовательную штамповку листов статора и ротора на высокопроизводительных пресс-автоматах из холоднокатаной рулонной стали при безотходной вырубке (с отрицательными припусками), с приспособлением для размотки рулона, правки и подачи ленты в пресс, с выдачей из-под штампов листов в ориентированном положении; высокотемпературный отжиг, обезуглероживание и оксидирование листов в проходных автоматизированных печах с защитной атмосферой;

сборку, прессовку и скрепление сердечников статора и ротора на прессах-полуавтоматах;

изолирование пазов статора рулонным материалом на пазоизолировочных станках с производительностью 80—150 пазов в минуту;

намотку и укладку обмотки статора на статорообмоточных станках по системе раздельной намотки и всыпки. Существуют станки-автоматы, в которых объединены процессы изолирования пазов, намотки, всыпки и заклинивания обмотки, обжима и формовки лобовых частей. Производительность таких станков-автоматов — от 20 до 30 статоров в час, в зависимости от размеров сердечников;

бандажирование лобовых частей обмоток на станках со скоростью бандажирования от 0,7 (для двигателей с $h=112 \div 132$ мм) до 1,2 (для двигателей с $h=71 \div 100$ мм) стежка в секунду;

литье станин и подшипниковых щитов, например, на специальных линиях безопочной прессовой формовки и чугунного литья, с производительностью до 240 форм в час (до четырех изделий в одной форме), или автоматическое кокильное литье на механизированных линиях: станин — центробежное в металлические кокили с четырехсторонним радиальным разъемом при производительности до 200 отливок в час, подшипниковых щитов — в металлические кокили при производительности до 350 отливок в час;

плавку металла в индукционных печах с использованием в шихте отходов электротехнической стали после штамповки;

механическую обработку станин на автоматических станочных линиях с производительностью от 80 до 50 станин в час (большие числа относятся к двигателям меньших высот оси вращения);

механическую обработку подшипниковых щитов на автоматизированных агрегатных станках, рассчитанных на полную обработку деталей, с производительностью от 200 до 100 щитов в час;

механическую обработку валов на автоматических линиях с производительностью от 100 до 80 валов в час;

пропитку обмоток статора лаками без растворителей капельным методом при вращении статора и при одновременном нагреве обмотки током промышленной частоты; продолжительность процесса 20 мин;

заливку роторов алюминием, горячую посадку роторов на вал на специальном оборудовании;

сборку двигателей на комплексно-механизированных линиях с принудительным ритмом;

испытание двигателей на автоматических установках и станциях.

Полный цикл изготовления электродвигателей при массовом производстве складывается из следующих технологических процессов:

заготовительные процессы: изготовление литых заготовок из серого чугуна, из цветных сплавов, изготовление заготовок валов;

обработка деталей резанием: обработка станин, подшипниковых щитов и крышек, валов, вентиляторов и деталей вводных устройств;

холодная штамповка: изготовление кожухов вентиляторов;

изготовление пластмассовых деталей;

изготовление сердечников статора и ротора: штамповка листов, сборка и скрепление сердечников, заливка сердечников роторов;

обмоточно-изолировочные работы: изолирование пазов статора, намотка и укладка обмотки, заклинивание пазов, сборка схемы соединений, укладка междуфазной изоляции, оконцевание выводных концов, формовка и бандажировка лобовых частей, электрические испытания, пропитка и сушка;

сборочные работы: сборка и обработка статоров (в комплекте со станиной), сборка, обработка и балансировка роторов, сборка и обработка вентиляторов, общая сборка электродвигателей;

приемо-сдаточные испытания;

лакокрасочные покрытия и консервация: окраска чугунных и стальных деталей, деталей из цветных сплавов, окраска электродвигателей, консервация.

Все перечисленные технологические процессы обычно бывают взаимно связаны транспортными и загрузочно-разгрузочными операциями, устроенными по принципу завершения каждой технологической опера-

ции выдачей обработанного объекта в таком положении и месте, которые требуются для непосредственной загрузки на следующее рабочее место.

При изготовлении асинхронных двигателей с высотами оси вращения более 132 мм механизация и автоматизация технологических процессов применяется в тем меньшей степени, чем крупнее двигатели и чем меньше объем их выпуска.

При изготовлении двигателей с высотами оси вращения от 160 и примерно до 250 мм формовка станин и подшипниковых щитов при чугунном литье выполняется либо методом прессования на автоматических линиях отечественного производства, либо другими общеизвестными методами; механическая обработка станин ведется на автоматических линиях или на поточных линиях из агрегатных станков, обработка подшипниковых щитов на поточных линиях из агрегатных и специальных станков, обработка валов и роторов — на автоматических линиях; штамповка листов статора и ротора — на автоматизированных линиях, состоящих из нескольких прессов; сердечники статора, статоры в сборе, вентиляторы, детали вводных устройств обрабатываются на агрегатных и специальных станках, двухслойная статорная обмотка выполняется в основном вручную, с механизацией только отдельных операций, таких, как изолирование пазов, калибровка лобовых частей, испытание непропитанных статоров, транспортировка; существуют, однако, специальные схемы одно-двухслойных и двухслойных концентрических обмоток, приведенные в [Л. 33], при которых возможна механизированная укладка; пропитка применяется капельная, лаками без растворителей; сборка двигателей ведется на комплексно-механизированных линиях, испытание готовых двигателей — на комплексно-механизированных испытательных станциях для контрольных испытаний; окраска — на окрасочных конвейерах методом электростатического распыления с ручной подкраской пульверизатором или только методом пульверизатора.

При изготовлении двигателей с высотами оси вращения 280—355 мм для механической обработки литых и сварных станин предусматривается специальное и агрегатное оборудование, механическая обработка подшипниковых щитов выполняется на токарно-карусельных станках с программным управлением; сверление и нарезание отверстий — на агрегатных станках; обработка валов — на гидрокопировальных токарных автоматах с фрезеровкой торцов и центровкой на фрезерно-центровальных станках, роторы обтачиваются ротационным способом (свободно вращающимся резцом с круговой режущей кромкой), снижающим добавочные потери и повышающим к. п. д. двигателей; сборка и опрессовка сердечника статора для двигателей в исполнении IP23 с отдельно изготовляемым сердечником (например, рис. 9-11) выполняется на шихтовочной оправке, что устраняет необходимость проточки сердечника по внутреннему диаметру; обработка посадочных заточек нажимных шайб ведется на шихтовочной оправке, что обеспечивает надлежащую соосность сердечника статора и подшипниковых щитов; обмотка выполняется вручную; заливка роторов производится с предварительным подогревом сердечников, либо на вибрационных установках, либо является статической с подачей металла снизу. При изготовлении двигателей со сварной оболочкой весьма перспективным является применение принципиально новой технологии резки стальных листов по контуру плазмой. По сравнению с резкой газовым пламенем резка плазмой увеличивает скорость процесса в 4—4,5 раза, повышает

производительность труда в 2 раза, дает чистоту разреза на порядок выше при отсутствии брызг и наплывов.

При изготовлении высоковольтных двигателей с высотами оси вращения до 560—630 мм применяется преимущественно универсальное оборудование за немногими исключениями, как, например, карусельные станки с программным управлением, агрегатные сверлильно-нарезные станки и шаговые конвейеры поточной сборки. Обмотка статора и стержневого короткозамкнутого ротора выполняется вручную с механизацией и автоматизацией отдельных операций по изготовлению и изолированию секций обмотки статора и по нарезке и выгибанию лобовых частей алюминиевых стержней обмотки ротора, а также по чеканке стержней в пазах. Обточка роторов производится свободно вращающимся резцом с круговой режущей кромкой (ротационное резание).

Технология изготовления двигателей постоянного тока в основном не отличается от технологии изготовления асинхронных двигателей серийного производства, за исключением специфических процессов изготовления коллекторов, полюсов и полюсных катушек, укладки обмотки якорей и др.

9-3. ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

а) Станины и сердечники статоров

Конструкции станин двигателей в исполнениях по степени защиты IP44 и IP23 принципиально различны. Станины двигателей в исполнении IP44 имеют обычно форму цилиндра, либо с продольными ребрами на внешней поверхности у двигателей с $h \leq 355$ мм (рис. 9-1, 9-2,*а*, 9-27, 9-28), либо с трубками воздухоохладителя (рис. 9-3,*в*) у двигателей с $h > 400$ мм.

Рекомендуемые значения высоты ребер $h_р$ на станине в зависимости от высоты оси вращения двигателя h приведены на рис. 9-15.

На рис. 9-16 показана зависимость произведения $n_р h_р$ от высоты h; здесь $n_р$ — число ребер, приходящихся на четверть окружности станины. Произведение $n_р h_р$ представляет собою условную поверхность охлаждения ребристой станины на единицу длины. Из этого произведения можно определить при конструировании станины примерное число ребер и угол между соседними ребрами $\alpha_р$, если известна высота ребра $h_р$. В поперечном разрезе ребра имеют в верхней части радиус закругления, равный примерно 1 мм для двигателей с $h = 56 \div 63$ мм; 1,5 мм — с $h = 71 \div 132$ мм; 2,5 мм — с $h = 160 \div 250$ мм; 3,0—4,5 мм — с $h = 280 \div 355$ мм. Угол между стенками ребра $\beta_р$ равен 3° при $h = 50 \div 71$ мм и 4° при $h \geq 80$ мм (см. рис. 9-14,*а*).

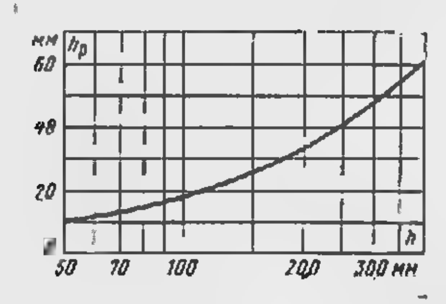
Трубки распределенного воздухоохладителя двигателей с высотами оси вращения свыше 400 мм и способом охлаждения IC0151 имеют наружный диаметр приблизительно 32 10 мм, одностороннюю толщину 1,5 мм и располагаются по всей окружности станины в два-три ряда.

Сердечник статора двигателей с высотами оси вращения до 400 мм сажается на гладкую обработанную внутреннюю поверхность станины, а в двигателях с высотами оси вращения свыше 400 мм для посадки сердечника предусмотрены продольные ребра.

Станины двигателей в исполнении IP23 имеют обычно гладкую внешнюю поверхность (рис. 9-2,*б*) и внутренние продольные ребра, обработанные под посадку сердечника (см. рис. 9-29, 9-31). У станин

двигателей с $h \leqslant 250$ мм предусматриваются обычно четыре внутренних ребра, а у станин двигателей с $h \geqslant 280$ мм — шесть внутренних ребер. При радиальной системе вентиляции в боковых частях станины располагают отверстия для выхода охлаждающего воздуха (рис. 9-5,*в*, 9-29, 9-30, 9-31). Отверстия закрывают жалюзи, штампованными из листовой стали или более эстетичными литыми из алюминиевых сплавов (рис. 9-2,*б*, 9-30).

Опорные лапы либо отливаются заодно со станиной, либо изготовляются отдельно и крепятся к ней (в отдельных случаях, при изготовлении станины литьем под давлением из алюминиевых сплавов); в сварных конструкциях лапы образуются обычно при надлежащем раскрое вертикальных стоек станины (рис. 9-10,*а*).



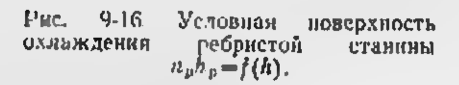
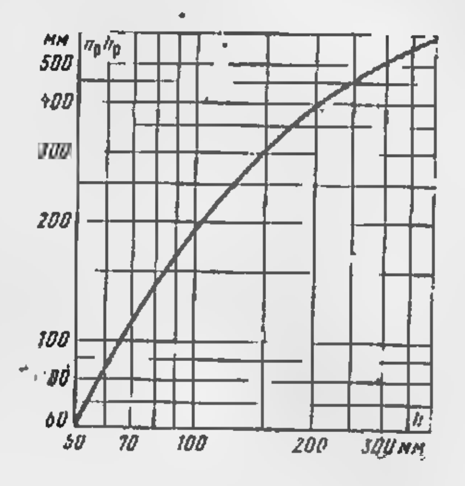

Рис. 9-15. Высота ребер станины $h_р = f(h)$.

Рис. 9-16. Условная поверхность охлаждения ребристой станины $n_р h_р = f(h)$.



В станинах предусматриваются специальные прилитые или приваренные основания для размещения вводного устройства с соответствующими окнами в станине для подвода выводных концов обмотки.

В соответствии с требованиями безопасности двигатели должны иметь зажимы для заземления корпуса, снабженные устройством, препятствующим самоотвинчиванию (один зажим на станине или на фланцевом щите и один — во вводном устройстве)

На торцах станины выполняют заточки для посадки и центрирования подшипниковых щитов; у двигателей с $h \leqslant 250$ мм цилиндрическая посадочная поверхность заточки обычно внешняя, у двигателей с $h \geqslant 280$ мм, особенно у двигателей в сварном исполнении, — внутренняя.

Для крепления подшипниковых щитов предусматривают в станине соответствующие приливы, ушки или опорные торцевые поверхности (в сварных исполнениях), в которых сверлят и нарезают отверстия для крепящих болтов.

Станины по внутреннему диаметру протачивают под посадку отдельно изготовленного сердечника статора (при $h \leqslant 250$ мм) или же под набирание сердечника по отдельным листам ($h \geqslant 280$ мм); в этом случае в станине (или в ее внутренних продольных ребрах) выбирают при проточке круговые прямоугольные канавки для закрепления спрессованного сердечника кольцевыми или поперечными (в случае наличия внутренних ребер) шпонками посредством нажимных шайб, также имеющих круговые заточки по торцам (см. рис. 9-31).

В верхней части станины располагают подъемный рым-болт (в больших двигателях — два болта), рассчитанный на массу двигателя (приложение 11). При массе двигателя менее 30 кг рым-болт отсутствует.

При сварной конструкции для подъема двигателя предусматривают проемы, боковые или торцевые крюки (см. рис. 9-10,*а*, 9-30), канавки для заведения троса (рис. 9-10,*б*) и т. д.

Толщина стенки литой станины может быть ориентировочно определена по рис. 11-2 (размер b_1). В сварных станинах механическую нагрузку несет преимущественно каркас, образованный стойками и ребрами, а стенки являются в основном обшивкой.

На станине, в легко обозримом месте, но не на съемных деталях или узлах, крепят табличку из некоррозионного материала с приведенными на ней основными техническими данными двигателя (ГОСТ 183-74).

Сердечник статора двигателя с $h\leqslant250$ мм набирается из вырубленных листов электротехнической стали с базированием по внутреннему диаметру и шлицам пазов. В случае применения стали марки 2013 листы после штамповки подвергают термической обработке на магнитные свойства с последующим оксидированием. Эти процессы ведутся в специальных печах с заданным автоматическим режимом.

Набранный сердечник опрессовывают под давлением около 1,5 МПа (45 кгс/см²) и без снятия давления пресса скрепляют специальными стальными скобами в форме желобков, которые располагаются по наружной поверхности сердечника в канавках, имеющих форму ласточкина хвоста (см. рис. 9-27—9-29); затем желобки скоб расправляют специальным приспособлением, концы скоб загибают и сердечник оказывается надежно скрепленным. Для сердечников двигателей с $h=50\div90$ мм более технологична сварка пакета.

Сердечники статора двигателей с $h\leqslant250$ мм протачивают по наружному диаметру, снимая припуск на штамповку (0,5 мм по радиусу). Обработка поверхности сердечника обеспечивает улучшенный тепловой контакт его со станиной.

Обмотанные и пропитанные сердечники статора двигателей с $h\leqslant250$ мм впрессовывают в станины (если станины не образуются обливкой сердечника алюминиевым сплавом). Для удобства опрессовки сердечника в станинах предусматривается «заходная» часть, т. е. обработка по несколько большему диаметру (на 1—3 мм), чем посадочная часть (рис. 9-27, 9-28).

Сердечники статора двигателей с $h\geqslant280$ мм, состоящие из листов, лакированных после штамповки и снятия заусенцев, изготовляют двумя способами: набирают либо непосредственно в станину и в процессе опрессовки закрепляют кольцевыми или поперечными шпонками, либо на центрирующую оправку вне станины и скрепляют стальными планками, располагаемыми в неглубоких прямоугольных канавках и привариваемыми к нажимным шайбам и частично к спинке сердечника (см. рис. 9-30). Второй способ сборки сердечника статора следует считать более прогрессивным, так как он обеспечивает необходимый размер и форму сердечника по внутреннему диаметру без растачивания, что существенно уменьшает потери в стали; кроме того, в сердечник, изготовленный вне станины, значительно легче укладывать обмотку, легче выполнять соединения, пропитывать и т. д.

Сердечники двигателей с $h\geqslant400$ мм, имеющие сравнительно большие длины, подразделяются на пакеты с радиальными вентиляцион-

ными каналами (см. § 14 2,б, а также рис. 9-81), образованными специальными распорками в виде двутавриков высотою 10 мм. Распорки размещаются на каждом зубце и проходят радиально до наружной части спинки; их приваривают предварительно к нескольким (по числу каналов) листам статора, принимая меры к надежному закреплению против случайного выпадания. Под нажимные шайбы сердечников на каждый зубец ставят нажимные пальцы, которые, так же как и двутаврики, крепят предварительно к двум листам сердечника. Нажимные пальцы представляют собой стальные полоски шириной 10 мм, приваренные «на ребро» к листам статора с гарантированным креплением против случайного выпадания.

В сварной конструкции двигателей с коробчатой станиной (см. § 9 1) к сердечнику статора, набранному на оправку и скрепленному, как указано выше, приваривают по бокам стальные пластины (см. рис. 9-30), которыми сердечник опирается на края коробчатой станины и крепится к ним болтами. На одной из этих планок и одной из планок, стягивающих сердечник, может быть размещено основание для вводного устройства (см. рис. 9 11 и 9-30); к верхней части этого основания может крепиться табличка технических данных. Коробчатая станина представляет собой либо сварную полутрубу со стойками, образующими опорные лапы и ребра с заточками для посадки сердечника и подшипниковых щитов (рис. 9-10,*а* и 9-30), либо чугунную литую коробку (рис. 9 10,*б* и *в*), на обработанных горизонтальных кромках торцевых и боковых стенок которой размещаются стояковые подшипники и сердечник статора.

б) Сердечники роторов

Листы сердечников роторов штампуются из высечки листов статора. Штамповка производится одновременно со штамповкой листов статора.

Листы роторов двигателей с $h \leq 250$ мм, изготовленные из стали марки 2013, подвергают после штамповки, как и листы статора, термической обработке для получения необходимых магнитных свойств, а также оксидированию, благодаря которому уменьшаются добавочные потери в роторе за счет создания изолирующего слоя между сердечником и алюминиевой клеткой. Листы ротора набирают на оправку по специальному знаку, прессуют до определенного размера по длине сердечника и без снятия давления закрепляют на оправке. В таком виде сердечник ротора поступает на заливку алюминием.

Листы короткозамкнутых роторов двигателей с $h \geq 280$ мм, предназначенных для заливки алюминием, оксидированию не подвергают, а весь сердечник после набора и спрессовки на оправке нагревают перед заливкой алюминием до 400—500°С, что обеспечивает образование достаточного оксидного слоя в пазах и между листами зубцов.

Сердечники короткозамкнутых роторов после заливки алюминием напрессовывают либо на гладкие валы без шпонки с предварительным нагревом сердечников до 500—550°С (для двигателей с $h \leq 250$ мм), либо со шпонкой при прессовой посадке (для двигателей с $h \geq 280$ мм).

Листы фазных роторов и роторов со сварной клеткой подвергают перед набором сердечника снятию заусенцев и лакировке. В этих случаях сердечник набирают непосредственно на вал, имеющий с одной стороны упорный заплечик, а с другой — канавку для кольцевой шпонки, крепящей сердечник после спрессовки. Сердечник сжимается на ва-

лу двумя нажимными шайбами, которые в случае фазных роторов имеют прилины, образующие обмоткодержатели. При изготовлении сердечников двигателей с $h>355$ мм под нажимными шайбами располагаются листы ротора с нажимными пальцами, а в местах расположения вентиляционных каналов — листы ротора с приваренными к ним распорками, подготовленные аналогично листам статора. При этом радиальные вентиляционные каналы ротора должны совпадать с каналами статора. Особое внимание должно быть обращено на обеспечение надежного крепления нажимных пальцев и вентиляционных распорок ротора.

После напрессовки на вал сердечники роторов, залитые алюминием, сердечники со сварными клетками, а также сердечники фазных роторов после сборки на валу и укладки обмотки протачивают до необходимых размеров по наружному диаметру для обеспечения предусмотренного воздушного зазора между статором и ротором. Наиболее прогрессивной является проточка роторов упомянутым выше (§ 9-2) ротационным резанием. Ротационный метод обработки роторов обеспечивает минимальные замыкания как между самими листами, так и между листами и выступающим в шлицах полузакрытых пазов алюминием, что существенно снижает добавочные потери.

в) Валы и их механический расчет

Привязка размеров выступающего конца вала асинхронных двигателей к высотам оси вращения, согласованная между странами — членами СЭВ, приведена для двигателей на номинальные напряжения до 660 В в табл. 2-4 и 2-5, а на напряжение 6000 В — в табл. 2-2. При этом диаметры выступающего конца вала определены в соответствии с рекомендациями МЭК (см. приложение 4) по наибольшему допускаемому моменту вращения при номинальном режиме работы исходя из согласованной увязки мощностей с высотами оси вращения и прочими установочными размерами.

При проектировании новых серий двигателей или отрезков этих серий с иной привязкой мощностей к установочным размерам выбор диаметра выступающего конца вала и его длины следует производить в соответствии с рекомендациями приложения 4.

Конструкция вала двигателей с различными высотами оси вращения представлена на рис. 9-3,*а*, *б*; 9-5,*б*, *в*, 9-27—9-31. Заготовкой для валов с диаметром до 100 мм под сердечником ротора обычно служит прокатанный цилиндрический пруток из стали преимущественно марки 45 (ГОСТ 1050-74); для двигателей наиболее массового участка серии применяются заготовки, получаемые методом поперечно-клинового проката, валы диаметром более 100 мм изготовляются из ступенчатых заготовок стали также преимущественно марки 45, получаемых методом ковки или прессовки.

Валы, получаемые из цилиндрических заготовок, проектируют с минимальными переходами от одной ступени к другой для уменьшения отходов и снижения трудоемкости механической обработки. В средней части вала, предназначенной под посадку сердечника ротора, у двигателей с $h \leq 250$ мм шпоночный паз не предусматривается, сердечник насаживается на вал горячей посадкой; у двигателей с $h \geq 280$ мм сердечник насаживается на вал со шпонкой. В конце вала с фазным ротором просверливается центральное отверстие для разме-

щения кабелей или шин, соединяющих обмотку с контактными кольцами.

Вал в своей средней части, несущей сердечник ротора, должен иметь достаточную жесткость и во всех сечениях достаточный запас прочности.

Первая критическая частота вращения вала должна превышать номинальную частоту вращения двигателя не менее чем на 30%.

Соответствие вала проектируемого двигателя всем этим требованиям проверяется изложенным ниже механическим расчетом.

При наличии двух или более длин сердечников двигателей с одинаковой частотой вращения расчет вала выполняют для двигателя с наиболее длинным сердечником.

Если для данного проектируемого двигателя выбраны по рекомендациям приложения 4 размеры выступающего конца вала, то по табл. 9-2 (см. § 9-3,*г*) определяется диаметр вала d_2 под посадку подшипников качения, а также диаметр вала d_3 за подшипником. Длина l между серединами подшипников качения устанавливается при конструировании двигателя.

Расчет вала на жесткость

Прогиб вала посредине сердечника ротора под действием силы тяжести, мм,

$$f_т = \frac{P'_2}{3El^2}(a^2S_b + b^2S_a)\cdot 10^6, \qquad (9\text{-}1)$$

где P'_2 — сила тяжести (вес) сердечника ротора с обмоткой и участком вала по длине сердечника, Н; E — модуль упругости материала вала, Па (для стали $E = 2{,}06\cdot 10^{11}$); a, b и l — по рис. 9-17,*а*, мм; значения S_a и S_b определяют в соответствии с размерами d, x и y, указанными на рис. 9-17,*а*, записывая все данные по форме, приведенной на с. 78. Здесь d_i — диаметр рассматриваемого участка вала; индексом i обозначаются также момент инерции J_i и расстояния x_i и y_i, соответствующие диаметру вала d_i.

Момент инерции, мм^4,

$$J_i = \pi d_i^4/64.$$

Приближенное значение силы тяжести P'_2, Н,

$$P'_2 = 64D_{н2}^2 l_2 \cdot 10^{-6}, \qquad (9\text{-}2)$$

где l_2 — длина сердечника ротора без радиальных вентиляционных каналов, мм; $D_{н2}$ — наружный диаметр сердечника ротора, мм.

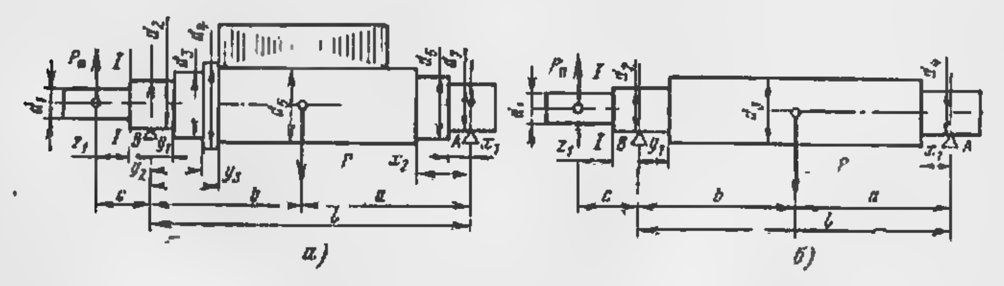


Рис. 9-17. Вал двигателя и действующие на него силы.
а — многоступенчатый вал; *б* — вал с минимальным количеством уступов.

Участок b								
a_i, мм	J_i, мм^4	y_i, мм	y_i^3, мм^3	$y_i^3-y_{i-1}^3$, мм^3	$\frac{y_i^3-y_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$	y_i^2, мм^2	$y_i^2-y_{i-1}^2$, мм^2	$\frac{y_i^2-y_{i-1}^2}{J_i}$, мм$^{-2}$
$S_b=\sum\frac{y_i^3-y_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$						$S_0=\sum\frac{y_i^2-y_{i-1}^2}{J_i}$, мм$^{-2}$		

Прогиб вала посредине сердечника ротора от реакции передачи, мм,

$$f_п=\frac{P_п c}{3El^2}[(1{,}5lS_0-S_b)a+bS_a]\cdot 10^6, \tag{9-3}$$

где S_0 определяют, заполняя форму, приведенную выше; $P_п$ — реакция передачи, Н,

$$P_п=k_п M_2\cdot 10^3/r, \tag{9-4}$$

M_2 — номинальный вращающий момент, Н·м.

$$M_2=9{,}57P_2/n,$$

P_2 — номинальная мощность, Вт; n — номинальная частота вращения, об/мин; r — радиус окружности шкива или кулачковой муфты, мм, $k_п=3$ — при передаче плоским ремнем, $k_п=1{,}8$ при передаче клиновыми ремнями, $k_п=0{,}3$ при передаче упругой кулачковой муфтой (учитывая неоднородную плотность кулачков).

Примем, что сила $P_п$ приложена к середине шкива или упругой части кулачка. Размеры клиноременных шкивов и муфт выбираем по приложениям 12 и 13.

У асинхронных двигателей с $h\leqslant 250$ мм вал имеет уступы только в местах расположения подшипников качения (рис. 9-17,б). С достаточным приближением для таких валов можно принять:

$$S_b=(b^3-y_1^3)/J,\ мм^{-1}; \tag{9-5}$$

$$S_a=(a^3-x_1^3)/J,\ мм^{-1}; \tag{9-6}$$

$$S_0=(a^3-x_1^2)/J,\ мм^{-2}, \tag{9-7}$$

где

$$J=\pi d_3^4/64,\ мм^4. \tag{9-8}$$

Начальный расчетный эксцентриситет ротора, мм,

$$e_0=k\delta+f_т+f_п, \tag{9-9}$$

где δ — воздушный зазор, мм; $k=0{,}1$ при $\delta\geqslant 0{,}5$ мм, $k=0{,}15$ при $\delta<$ $<0{,}5$ мм.

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения, Н, при числе полюсов $2p=2$

$$P_м=0{,}1D_м l_1\frac{e_0}{\delta}, \tag{9-10}$$

S_a, S_b, S_0

Участок a					
d_i, мм	J_i, мм^4	x_i, мм	x_i^3, мм^3	$x_i^3-x_{i-1}^3$, мм^3	$\frac{x_i^3-x_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$
$S_a=\sum\frac{x_i^3-x_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$					

при числах полюсов $2p>2$

$$P_м=0,15D_{н2}l_2\frac{e_0}{\delta}. \quad (9\text{-}11)$$

Прогиб вала под действием силы $P_м$, мм,

$$f_0=f_т P_м/P'_2. \quad (9\text{-}12)$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения, мм,

$$f_м=\frac{f_0}{1-f_0/e_0}. \quad (9\text{-}13)$$

Результирующий прогиб вала от силы тяжести ротора, реакции передачи и магнитного притяжения

$$f=f_т+f_п+f_м. \quad (9\text{-}14)$$

Результирующий прогиб вала не должен превышать 12% (в исключительных случаях 15%) воздушного зазора δ. В противном случае необходимо увеличить диаметр вала в средней части и повторить расчет.

Определение критической частоты вращения

Первая критическая частота вращения вала с учетом влияния магнитного притяжения, об/мин,

$$n_{кр}=950\sqrt{\frac{1-f_0/e_0}{f_т+f_{шк}}}, \quad (9\text{-}15)$$

где прогиб вала от силы тяжести шкива или полумуфты $f_{шк}=f_п P_{шк}/P_п$; сила тяжести шкива или полумуфты $P_{шк}=9{,}81G_{шк}$, Н; массу шкива или полумуфты $G_{шк}$ выбираем по приложениям 12 и 13.

Полученное значение $n_{кр}$ должно удовлетворять неравенству

$$n_{кр}>1{,}3n.$$

Расчет вала на прочность

Вал на прочность рассчитывают на участках c и b, причем при расчете выступающего конца вала принимают его диаметр уменьшенным на глубину шпоночного паза $h_{шп}$.

Изгибающий момент в рассматриваемом сечении вала на участке c, Н·м,

$$M_и = k(P_п + P_{шк}) z_1 \cdot 10^{-3}, \quad (9\text{-}16)$$

где $k = M_{2макс}/M_2$ принимается равным 2.

При соединении двигателя с приводимым механизмом посредством шкива отрезки z_1 и c отсчитываются от середины длины выступающего конца вала, как показано на рис. 9-17,*а*; при соединении посредством упругой муфты они отсчитываются от середины кулачков муфты и для такого случая z_1 будет представлять собою сумму длины полумуфты и половины длины кулачка (по обозначениям, принятым в приложении 13 $z_1 = L/2 + l_1/2$).

Соответственно определяются и другие размеры на участке c.

Для определения $M_и$ на участке b необходимо определить реакцию опоры B, Н,

$$R_b = (P'_2 + P_м) a/l + P_п (l+c)/l. \quad (9\text{-}17)$$

Изгибающий момент в рассматриваемом сечении вала на участке b, Н·м,

$$M_и = [P_п(c+y) + R_b y] \cdot 10^{-3}. \quad (9\text{-}18)$$

Момент кручения, Н·м,

$$M_к = k M_2. \quad (9\text{-}19)$$

Момент сопротивления при изгибе, мм³,

$$W = 0{,}1 d^3_i. \quad (9\text{-}20)$$

При совместном действии изгиба и кручения эквивалентное напряжение, Па,

$$\sigma_{экв} = \frac{\sqrt{M^2_и + M^2_к}}{W} 10^9. \quad (9\text{-}21)$$

Значение $\sigma_{экв}$ ни в одном сечении вала не должно превышать $0{,}7\sigma_т$, где $\sigma_т$ — предел текучести стали на растяжение. Например, для стали марки 45 $\sigma_т = 350 \cdot 10^6$ Па.

Пример. Рассчитать вал асинхронного двигателя мощностью 250 кВт, с частотой вращения 1470 об/мин, соединенный с приводимым механизмом упругой муфтой Диаметр ротора $D_{н2} = 380$ мм, длина ротора $l_2 = 255$ мм, воздушный зазор $\delta = 1$ мм. Радиус окружности кулачковой муфты типа МУВП1-90 (приложение 13) $r = 121$ мм,

Участок b								
d_i, мм	J_i, 10^6 мм⁴	y_i, мм	y_i^3, 10^3, мм³	$y_i^3 - y_{i-1}^3$, 10^3 мм³	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$, мм⁻¹	y_i^2, 10^3 мм²	$y_i^2 - y_{i-1}^2$, 10^3 мм²	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$, 10^{-3}, мм⁻²
100	490	60	216	216	0,044	3,6	3,6	0,073
105	505	140	2750	2534	0,425	19,6	16	0,259
115	855	185	6300	3550	0,415	34,2	14,6	0,1707
110	720	420	74 500	68 200	9,5	176	141,8	1,97
$S_b = 10{,}38$ мм⁻¹						$S_v = 0{,}0248$ мм⁻²		

масса муфты 80 кг. Вал имеет следующие размеры (см. рис. 9-17,*а*), мм: $d_1=90$, $d_2=100$; $d_3=105$; $d_4=115$; $d_5=110$; $d_6=105$; $z_i=85$; $c=150$; $y_1=60$; $y_2=140$; $y_3=185$; $b=420$; $a=460$; $l=880$; $x_1=60$; $x_2=140$.

Расчет вала на жесткость

Сила тяжести сердечника ротора с обмоткой и участком вала по его длине по (9-2), Н,

$$P'_2=64\cdot380^2\cdot255\cdot10^{-6}=2350.$$

Для определения прогиба вала рассчитаем вспомогательные значения S_a, S_b и S_0, заполнив форму, приведенную на с. 78, и результаты представим в табл. 9-1.

Прогиб вала посредине сердечника ротора под действием силы тяжести по (9-1), мм,

$$f_т=\frac{2350}{3\cdot2{,}06\cdot10^{11}\cdot880^2}(460^2\cdot10{,}38+420^2\cdot13{,}6)\cdot10^6=0{,}0225.$$

Номинальный вращающий момент, Н·м,

$$M_2=9{,}57\,\frac{250\cdot10^3}{1470}=1628$$

(наибольший допускаемый момент по приложению 4 равен 1900 Н·м)

Реакция передачи по (9-4), Н,

$$P_п=0{,}3\,\frac{1628}{121}\,10^3=4030.$$

Прогиб вала посредине сердечника ротора от реакции передачи по (9-3), мм,

$$f_п=\frac{4030\cdot150}{3\cdot2{,}06\cdot10^{11}\cdot880^2}\,[(1{,}5\cdot880\cdot0{,}0248-10{,}38)\,460+420\cdot13{,}6]\cdot10^6=0{,}0202.$$

Начальный расчетный эксцентриситет ротора по (9-9), мм,

$$e_0=0{,}1\cdot1+0{,}0225+0{,}0202=0{,}1427.$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения по (9-11), Н,

$$P_м=0{,}15\cdot380\cdot255\,\frac{0{,}1427}{1}=2060.$$

Прогиб вала под действием силы $P_м$ по (9-12), мм,

$$f_э=0{,}0225\,\frac{2060}{2350}=0{,}0197.$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения по (9-13), мм,

$$f_м=\frac{0{,}0197}{1-0{,}0197/0{,}1427}=0{,}0228.$$

Таблица 9-1

Участок *а*					
d_i, мм	J_i, 10^4 мм^4	x_i, мм	x_i^3, 10^3 мм^3	$x_i^3-x_{i-1}^3$, 10^3 мм^3	$\frac{x_i^3-x_{i-1}^3}{J_i}$, мм$^{-1}$
100 105 110	490 595 720	60 140 460	216 2744 97 300	216 2528 94 550	0,044 0,424 13,131
$S_a=13{,}6$ мм$^{-1}$					

Результирующий прогиб вала от силы тяжести ротора, реакции передачи и магнитного притяжения по (9-14), мм,

$$f = 0{,}0225 + 0{,}0202 + 0{,}0228 = 0{,}0655.$$

Прогиб составляет 6,55% воздушного зазора, что допустимо.

Сила тяжести полумуфты, Н,

$$P_{шк} = 9{,}81 \cdot 80/2 = 392.$$

Прогиб вала от силы тяжести полумуфты по (9-15), мм,

$$f_{шк} = 0{,}0202 \frac{392}{4030} = 0{,}00197.$$

Первая критическая частота вращения вала с учетом влияния магнитного притяжения по (9-15), об/мин,

$$n_{кр} = 950 \sqrt{\frac{1 - 0{,}0197/0{,}1427}{0{,}0225 + 0{,}00197}} = 5650,$$

$$5650 > 1{,}3 \cdot 1470 = 1911.$$

Расчет вала на прочность

Проведем расчет вала на прочность в обычно наиболее напряженном сечении $I-I$ (рис. 9-17,*а*).

Примененной упругой муфте МУВП1-90 соответствует

$$z_1 = 175 + 75/2 = 212{,}5 \text{ мм}.$$

Момент кручения по (9-19), Н·м,

$$M_к = 2 \cdot 1628 = 3256.$$

Изгибающий момент по (9-16), Н·м,

$$M_и = 2(4030 + 392) 212{,}5 \cdot 10^{-3} = 1880.$$

Расчетный диаметр свободного конца вала за вычетом глубины шпоночного паза равен 83 мм.

Момент сопротивления при изгибе по (9-20), мм³,

$$W = 0{,}1 \cdot 83^3 = 57\,000.$$

Эквивалентное напряжение при совместном действии изгиба и кручения по (9-21), Па,

$$\sigma_{экв} = \frac{\sqrt{1880^2 + 3256^2}}{57\,000} 10^9 = 66 \cdot 10^6.$$

При стали марки 45 отношение $\sigma_{экв}/\sigma_т = \frac{66 \cdot 10^6}{350 \cdot 10^6} = 0{,}188$, что допустимо.

г) Подшипниковые щиты и подшипники. Расчет подшипников качения

Для создания большей жесткости подшипниковых щитов следует при разработке конструкции максимально сокращать аксиальный размер щита, выполняя его в форме, близкой к диску. Такая форма щита благоприятно влияет также на уменьшение перекоса подшипников и дает возможность у двигателей в исполнении IP44 увеличить длину станины и ее оребренную поверхность охлаждения. Подшипниковые щиты двигателей со степенью защиты IP44 имеют, как правило, гладкую поверхность; щиты из алюминиевых сплавов могут иметь оребренную поверхность (см. рис. 9-1).

Подшипниковые щиты двигателей в исполнении IP23 имеют в торцевой части отверстия для входа охлаждающего воздуха, которые либо

закрываются жалюзи, соответствующими требованиями степени защиты IP23 (рис. 9-2,*б* и 9-10,*а*), либо снабжаются патрубками (рис. 9-5,*б*, *в*), закрытыми защитными решетками. На внутренней части подшипниковых щитов двигателей в исполнении IP23 при радиальной системе вентиляции крепятся щитки, направляющие воздух (рис. 9-5,*б* и *в*, а также 9-29—9-31), выполняемые из листовой стали в виде воронок. Направляющие щитки должны быть расположены на минимальном практически достижимом аксиальном расстоянии от торцов лопаток ротора (5—7 мм). При проектировании двигателя конусную часть направляющего щитка нужно выбирать и размещать таким образом, чтобы были обеспечены достаточные площади поперечного сечения путей для прохождения охлаждающего воздуха между щитком и узлом подшипника и между щитком и лобовыми частями обмотки статора (с учетом соединений на торце лобовой части).

По наружному диаметру подшипниковых щитов предусматриваются ушки с отверстиями для болтов, крепящих щиты к станине, и круговая цилиндрическая заточка («замок») для посадки на заточку станины при сборке двигателя. Наиболее целесообразно такое исполнение щитов и станины, при котором ушки щитов и соответствующие им приливы на станине при завертывании болтов плотно смыкаются (т. е. чтобы ушки были обработаны заодно с проточкой замка); это гарантирует от возможных перекосов щитов при сборке двигателя и от их деформации, которая может возникнуть при неравномерном затягивании болтов, если между ушками и станиной в конструкции предусматривается заведомое расстояние; перекос щитов ведет к появлению вибраций и к ускорению износа подшипников. Однако обработка щитов и станины по ушкам происходит с ударами резца, что снижает точность обработки, ускоряет износ инструмента и удлиняет технологический процесс. Практически принимается компромиссное решение, когда ушки обрабатываются только на некоторую наиболее рациональную часть высоты.

В средней части щита расположена втулка под посадку подшипника. Втулка может иметь сквозную проточку, если подшипник крепится по торцам двумя подшипниковыми крышками (рис. 9-3,*б*, *в*; 9-5,*б*, *в*, а также 9-28, 9-29 и 9-31) или одной подшипниковой крышкой (рис. 9-3,*а*) и если подшипник снабжен с другой стороны уплотнением против вытекания смазки. В последнем случае целесообразно отверстие под посадку подшипника делать не сквозным, а глухим (как это можно видеть на рис. 9-27), т. е. совмещать подшипниковую крышку со щитом. Такое исполнение целесообразно также в тех случаях, когда предусматривается применение подшипников с двусторонним уплотнением (типа 180000, см. приложение 14) и с заложенной на весь срок службы консистентной смазкой.

Подшипниковые крышки имеют соответствующую цилиндрическую центрирующую заточку под диаметр отверстия для посадки подшипника. Торцевая часть бортиков подшипниковых крышек служит для крепления подшипника в аксиальном направлении. При этом если со стороны выступающего конца вала предусматривается роликовый подшипник (обычно у двигателей с $h \geqslant 160$ мм), то наружные кольца обоих подшипников (роликового и шарикового) наглухо зажимаются подшипниковыми крышками, так как роликовый подшипник обеспечивает возможность аксиальных перемещений вала, компенсируя при сборке двигателя отклонения в точности обработки станины, щитов, вала по аксиальным размерам, а также различие тепловых деформаций этих

элементов конструкции в рабочем режиме. В тех случаях, когда оба подшипника шариковые ($h<160$ мм), применяют пружинящие шайбы в виде гофрированного кольца, штампованного из стальной ленты толщиной примерно 0,4 мм (см. рис. 9-27), закладываемые между заточками наружных подшипниковых крышек и наружными кольцами шарикоподшипников. Наличие пружинящих шайб в значительной мере снижает вибрацию двигателей. Иногда их применяют и при наличии роликоподшипника на другом конце вала (см. рис. 9-28 и 9-29).

В подшипниковых крышках, а в случае отсутствия их — в подшипниковых щитах предусматриваются лабиринтные круговые канавки прямоугольного сечения для предотвращения вытекания консистентной смазки через зазор между крышкой и валом. Канавки при сборке двигателя заполняют смазкой.

Оба подшипниковых щита двигателя выполняются одинаковыми по всем размерам.

В подшипниковых щитах двигателей с высотами оси вращения свыше 132 мм, предусматривается устройство для пополнения и частичной замены консистентной смазки. Свежая смазка подается под давлением через специальное отверстие в щите под внутреннюю крышку подшипника. Отработанная смазка специальной шайбой или крылаткой, насаженной на вал рядом с подшипником, сбрасывается в небольшой выдвижной или съемный контейнер, из которого затем удаляется в процессе обслуживания (рис. 9-18, а также см. рис. 9-30 и 9-31).

Рис. 9-18. Устройство для пополнения и частичной замены консистентной смазки подшипников.

У двигателей в исполнении с фланцевым щитом (с лапами или без лап, вертикальных) фланец отливается заодно с подшипниковым щитом; его опорная плоскость должна находиться на одном уровне с заплечиком выступающего конца вала. Стандартные размеры фланцев приведены в ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 20839-75.

В табл. 9-2 дана рекомендуемая конструктивная увязка между стандартным диаметром выступающего конца вала двигателя (d_1), внутренним диаметром подшипника (d_2) и диаметром вала за подшипником (d_3) (рис. 9-17).

Таблица 9-2

Рекомендуемые значения диаметров вала, мм

d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
7	8	12	32	35	44	75	80	92
9	10	15	38	40	49	80	85	99
11	12	17	42	45	54	85	90	104
14	15	20	48	50	60	90	95	109
16	17	22	55	60	72	95	100	114
19	20	26	60	65	77	100	105	119
24	25	32	65	70	82	110	120	134
28	30	37	70	75	87	120	130	148

Внутреннее кольцо подшипника качения насаживается на вал плотно и при очередных разборках двигателя с вала не снимается, а наружное кольцо входит в подшипниковый щит подвижно, что облегчает сборку и разборку двигателя.

Условия работы подшипников качения в электродвигателях усложняются наличием малого зазора между статором и ротором, возникновением одностороннего магнитного притяжения при эксцентрическом положении ротора, а также нагревом от активных частей машины.

Радиальные однородные шарикоподшипники могут воспринимать кроме радиальной также и осевые нагрузки в обе стороны, причем осевые нагрузки не должны превышать 70% неиспользованной допустимой радиальной нагрузки, поэтому двигатели с одними и теми же шарикоподшипниками могут применяться для работы как с горизонтальным, так и с вертикальным положением вала при условии, что подшипники обладают достаточным запасом по динамической грузоподъемности.

Расчет подшипников качения заключается в выборе таких подшипников, которые обеспечивают расчетный срок службы при заданной нагрузке и частоте вращения. Расчет подшипников, как и расчет вала, выполняют для двигателя с наиболее длинным сердечником.

Расчет подшипников качения

Наибольшую радиальную нагрузку R_b на подшипник B, Н, определяют по (9-17).

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник A, Н,

$$R_a = (P'_2 + P_м) b/l + P_п c/l. \quad (9\text{-}22)$$

Динамическая приведенная нагрузка [Л. 34], Н,

для шарикоподшипника однорядного радиального

$$Q = K_н R \text{ при } A/R \leqslant e, \quad (9\text{-}23а)$$

$$Q = K_н (0{,}56 R + YA) \text{ при } A/R > e; \quad (9\text{-}23б)$$

для роликоподшипника радиального с короткими цилиндрическими роликами рассчитывается по (9-23а);

для шарикоподшипника радиально-упорного сдвоенного

$$Q = K_н (R + 0{,}92 A) \text{ при } A/R \leqslant 0{,}68, \quad (9\text{-}24а)$$

$$Q = K_н (0{,}67 R + 1{,}41 A) \text{ при } A/R > 0{,}68. \quad (9\text{-}24б)$$

Здесь $K_н$ — коэффициент, учитывающий характер нагрузки двигателя; для наиболее распространенного режима работы с умеренными толчками и кратковременной перегрузкой до 150% номинальной нагрузки $K_н = 1{,}5$; A — аксиальная нагрузка, Н; Y — коэффициент приведения аксиальной нагрузки к радиальной.

Значения e и Y однорядного радиального шарикоподшипника в зависимости от A/C_0, где C_0 — статическая грузоподъемность, Н (см. приложение 14), определяют по следующим данным:

A/C_0	e	Y	A/C_0	e	Y	A/C_0	e	Y
0,014	0,19	2,30	0,084	0,28	1,55	0,28	0,38	1,15
0,028	0,22	1,99	0,11	0,30	1,45	0,42	0,42	1,04
0,056	0,26	1,71	0,17	0,34	1,31	0,56	0,44	1,00

Для промежуточных значений A/C_0 применяют линейную интерполяцию.

В тех случаях, когда A/R меньше 0,19, приведенная нагрузка $Q=R$. При отсутствии аксиальной нагрузки и горизонтальном расположении вала осевое магнитное притяжение, принимаемое равным $0,1\ R$, соответственно не учитывается при определении приведенной нагрузки; при вертикальном расположении вала асинхронного двигателя аксиальная нагрузка, Н,

$$A=P'_2+P_{шк}+0,1\ R.$$

Здесь силу P'_2, определяемую по (9-2), увеличивают на 15%

Необходимая динамическая грузоподъемность, Н,

шарикоподшипника

$$C=\frac{Q}{25,6}\sqrt[3]{L_д n}, \tag{9-25а}$$

роликоподшипника

$$C=\frac{Q}{18,5}(L_д n)^{0,3}, \tag{9-25б}$$

где $L_д$ — номинальная долговечность (расчетный срок службы) подшипника, ч; n — наибольшая частота вращения двигателя, об/мин.

По приложению 14 подбирают подшипник соответствующей серии, у которого внутренний диаметр равен диаметру шейки вала двигателя, а динамическая грузоподъемность не менее необходимого значения, определенного по (9-25а) или (9-25б)

Пример. Рассчитать подшипники качения. В качестве исходных принимаем данные, указанные в примере расчета вала в § 9-3,в.

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник A по (9-22), Н,

$$R_a=(2350+2060)\frac{420}{880}+4030\frac{150}{880}=2795.$$

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник B по (9-17), Н,

$$R_b=(2350+2060)\frac{460}{880}+4030\frac{880+150}{880}=7020.$$

Принимаем нагрузку со слабыми толчками ($K_в=1,5$); аксиальная нагрузка от приводимого механизма отсутствует; подшипники радиальные; со стороны A — шариковый, со стороны B — роликовый. В этом случае динамическая приведенная нагрузка на подшипник A по (9-23а), Н,

$$Q_a=1,5\cdot2795=4190,$$

То же на подшипник B

$$Q_b=1,5\cdot7020=10\,550$$

Принимаем расчетный срок службы подшипников 12 000 ч; наибольшая частота вращения 1500 об/мин.

Из (9-25а) для подшипника A необходимая динамическая грузоподъемность, Н,

$$C=\frac{4190}{25,6}\sqrt[3]{12\,000\cdot1500}=42\,900.$$

Выбираем по приложению 14 для стороны A с учетом повышения надежности шарикоподшипник № 320 средней серии со значением $C=134\,000$ Н.

Для подшипника B из (9-25б)

$$C=\frac{10\,550}{18,5}(12\,000\cdot1500)^{0,3}=85\,500\ Н.$$

Выбираем по приложению 14 для стороны B соответственно роликоподшипник средней серии № 32320 со значением $C=238\,000$ Н

д) Обмотки статора

Обмотки статора асинхронных двигателей можно подразделить на основные группы, приведенные в табл. 14-9.

Обмотка статора двигателей с высотами оси вращения 50—160 мм ввиду их массового производства выполняется обычно на автоматических статорообмоточных станках с раздельной намоткой катушечных групп, с аксиальным втягиванием их в пазы сердечника статора, заклиниванием обмотки в пазах, обжимом и формовкой лобовых частей (см. § 9-2). Проведение этих автоматических операций наиболее технологично для однослойной концентрической обмотки.

Существуют также и другие статорообмоточные станки, работающие на принципе непосредственной намотки однослойных концентрических катушек в пазы; однако раздельная намотка катушек позволяет получить меньшие размеры лобовых частей обмотки, что сказывается на уменьшении габаритных размеров двигателя по длине. Кроме того, раздельная намотка катушек позволяет устранить нежелательное удлинение (вытягивание) обмоточного провода, которое наблюдается при работе многих современных статорообмоточных станков с непосредственной укладкой провода в пазы.

Заслуживает внимания опыт некоторых зарубежных фирм, использующих импульсный метод уплотнения и выравнивания (ликвидация «крестов») обмоток, втянутых в пазы статорообмоточными станками.

Наибольший коэффициент заполнения пазов круглым проводом при укладке на статорообмоточных станках без использования импульсного уплотнения равен примерно 0,70—0,72. Полузакрытые трапецеидальные пазы статора должны иметь шлицы достаточной ширины для обеспечения наиболее технологичной укладки обмотки (см. § 14-3, табл. 14-16). Пазовые коробочки из этих же соображений выполняются однослойными, нарезаются из рулонного материала, формуются и укладываются в пазы автоматически (см. § 9-2). Коробочки на выходе из паза по торцам сердечника, поскольку они должны выдерживать значительные механические воздействия при укладке обмотки, отгибке и формовке лобовых частей, механически усиливают заворачиванием краев на 180° или обклейкой их полосками прочного материала. Вылеты коробочек с каждой стороны сердечника составляют 4—8 мм в зависимости от высоты оси вращения двигателя. Заклинивание пазов происходит также автоматически. В качестве клиньев целесообразно применение пазовых крышек из однослойного изоляционного материала, отформованных в виде желобков по форме верхней части паза.

В лобовые части обмотки между головками катушек укладываются прокладки из листового изоляционного материала, идущего и на изготовление пазовых коробочек.

К выводным концам катушечных групп, образующих обмотку фазы, припаиваются соединительные провода; места паек и соединительные провода изолируются изоляционными трубками; в качестве выводных концов обмотки применяются гибкие кабели с изоляцией соответствующих классов нагревостойкости. На лобовые части обмотки со стороны соединений и с противоположной стороны накладываются бандажи из стеклошнура (стеклочулка) или полиэтилентерефталатной нити; обычно эта операция выполняется механизированным способом на специальных быстродействующих станках (см. § 9-2).

Обмотанные статоры с изоляцией класса нагревостойкости В подвергаются пропитке в лаках без растворителей (капельным или струйным методом) После соответствующей тепловой полимеризации лаки надежно цементируют лобовые и пазовые части обмоток, обеспечивая их механическую и электрическую прочность в эксплуатации, а также повышая теплопроводность путей отвода тепла от внутренних слоев обмотки к внешним и к сердечнику статора.

Конструкция изоляции всыпной обмотки статора при полузакрытых трапецеидальных пазах двигателей с $h=50\div160$ мм приведена в табл. 9-3

Обмотка статора двигателей с $h=180\div250$ мм выполняется обычно двухслойной с соответствующим укорочением шага (см. § 14 3). Укладка намотанных на шаблон катушечных групп в полузакрытые трапецеидальные пазы производится либо вручную, либо механизированным способом при применении специальных схем, приведенных в [Л. 33]. Одной из них является двухслойная концентрическая обмотка.

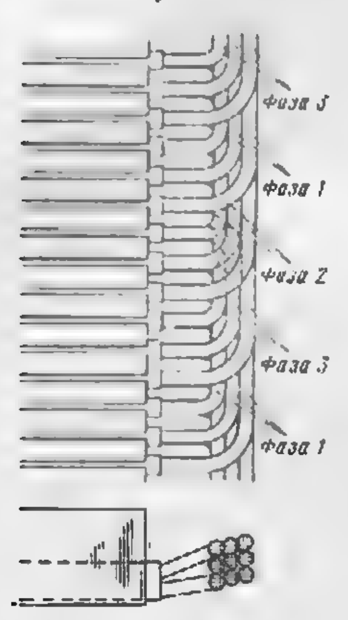


Рис. 9-19 Расположение катушек в лобовой части двухслойной концентрической обмотки.

Пазовые коробочки и изоляционные прокладки в лобовых частях двухслойной обмотки выполняются так же, как и у однослойной обмотки двигателей с $h=50\div160$ мм. Между верхним и нижним слоями обмотки в пазах и лобовых частях помещаются прокладки обычно из того же изоляционного материала, что и пазовые коробочки. Пазовые крышки при изоляции обмотки класса В выполняются преимущественно из заготовок, полученных методом экструзии из термопластичных материалов. Толщина крышек в поперечном сечении колеблется от 1,0—1,5 мм в средней части до 0,5—0,75 мм по краям. При изоляции обмотки классов F и H пазовые крышки изготовляются из соответствующих листовых материалов. В ряде случаев применяются обычные пазовые клинья из стеклотекстолита толщиной 2,5 мм, имеющие форму верхней части паза. В остальном выполнение обмотки полностью аналогично выполнению ее у двигателей с $h=50\div160$ мм

Двухслойная концентрическая обмотка статора (рис. 14-2,б) отличается от обычной двухслойной обмотки тем, что катушка каждой катушечной группы с числом катушек, равным q_1 (или $q_1/2$ при большом и четном q_1), имеют П-образную форму лобовой части с закругленными углами и расположены концентрически (рис. 9-19, 14-6,б). Между катушечными группами (верхним и нижним слоями) в лобовых частях устанавливаются изоляционные прокладки; эти прокладки не должны перекрывать воздушные промежутки между прямолинейными вылетами соседних катушек, так как эффективность охлаждения, особенно для степени защиты IP23, зависит в значительной мере от величины этих промежутков. Надлежащим образом выполненная концентрическая обмотка имеет, как показывают опыты, превышение температуры при радиальной системе вентиляции (в исполнении двигателя IP23) на 10—15°С ниже, чем обычная двухслойная обмотка. Двухслой-

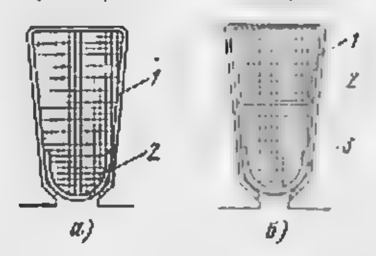
ная концентрическая обмотка отличается от обычной двухслойной повышенной надежностью (благодаря отсутствию перекрещиваний и смещений проводников в лобовых частях) и более коротким вылетом лобовых частей.

Конструкция изоляции всыпной обмотки статора при полузакрытых трапецеидальных пазах двигателей с $h=180\div250$ мм приведена в табл. 9-3.

Таблица 9-3

Изоляция обмотки статора асинхронных двигателей

(пазы трапецеидальные полузакрытые; обмотка однослойная и двухслойная всыпная из круглого эмалированного провода; напряжение до 660 В)



Обмотка	Высота оси вращения h, мм	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка: Класс В	Класс F	Класс H	Толщина, мм	Число слоев	Односторонняя толщина, мм
Однослойная, рис. *а*	50—80	*1*	Пленкостеклопласт Изофлекс	Имидофлекс		0,2	1	0,2
		2	То же	То же		0,3	1	0,3
	90—132	*1*	Пленкостеклопласт Изофлекс	Имидофлекс		0,25	1	0,25
		2	То же	То же		0,35	1	0,35
	160	*1*	Пленкостеклопласт Изофлекс	Имидофлекс		0,4	1	0,4
		2	То же	То же		0,5	1	0,5
Двухслойная, рис. *б*	180—250	*1*	Пленкостеклопласт Изофлекс	Имидофлекс		0,4	1	0,4
		2	То же	То же		0,4	1	0,4
		3	То же	То же		0,5	1	0,5

Примечание. Междуфазные прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала, указанного в поз. *1* (рис. *а* или *б*).

Обмотка статора двигателей с $h=280\div355$ мм выполняется из прямоугольных эмалированных проводов, укладываемых в прямоугольные полуоткрытые пазы в виде формованных полукатушек. Заготовки катушек представляют собою намотанные на шаблон «лодочки», проводники которых по пазовым и лобовым частям скрепляются специальным обволакивающим покрытием, а затем подвергаются растягиванию и формовке с опрессовкой пазовых частей. Пазовые части

дополнительно скрепляются либо телефонной бакелизированной (класс B), либо фенилоновой лакированной (классы F и H) бумагой.

Обе полукатушки, укладываемые поочередно в нижнюю или в верхнюю части полуоткрытого паза через шлиц, проходят технологический цикл изготовления, от намотки до растяжки и опрессовки, совместно; они расчленяются только непосредственно перед укладкой. На каждую лобовую часть полукатушек накладываются в двух-трех местах скрепляющие бандажи из стеклоленты шириной 20 и толщиной 0,1 мм в 2,5 оборота. Крайние полукатушки групп дополнительно изолируются в лобовых частях электроизоляционной стеклянной лентой, наложенной в один слой вполнахлеста. Лобовые части обмотки в процессе укладки катушек крепятся стеклочулком к бандажным кольцам (см. рис 9-30). Косые элементы лобовых частей («плечи» катушек) взаимно перевязываются в шахматном порядке стеклочулком с предварительной установкой между катушками местных распорок из стеклотекстолита. Торцы пазовых коробочек выступают из сердечника статора на 15—20 мм.

Двигатели с h=280÷315 мм при $2p$=10 и с h=315 мм при $2p$=12 выполняются обычно с трапецеидальными полузакрытыми пазами и всыпной двухслойной концентрической обмоткой из круглого эмалированного провода. Применение таких обмоток в тихоходных двигателях вышеуказанных высот оси вращения при сравнительно небольших мощностях (45—110 кВт, т. е. находящихся в диапазоне мощностей двигателей с $h \leqslant 250$ мм, где применяются только всыпные обмотки) позволяет повысить уровень энергетических показателей машин и технологичность обмотки, так как выполнение ее из жестких полукатушек при наименьшей допускаемой толщине прямоугольного провода, равной 1 мм, затруднительно.

Ряд зарубежных фирм применяет для двигателей с высотами оси вращения до 355 мм всыпные обмотки статора при всех числах полюсов. Достигаемый при этом несколько более высокий уровень энергетических показателей у двигателей с $2p$=2÷8 не может, однако, скомпенсировать существенно пониженную надежность таких обмоток по сравнению с обмотками из жестких полукатушек. Отечественная 40-летняя практика применения для низковольтных двигателей диапазона мощностей 100—500 кВт обмоток в виде жестких формованных полукатушек из прямоугольного провода показала их особо высокую надежность и долговечность. В перспективе можно считать целесообразным переход в этих двигателях на более технологичную (вдвое меньшее число катушек при том же числе пазов) и еще более надежную обмотку из жестких формованных катушек, укладываемых в открытые пазы с магнитными клиньями.

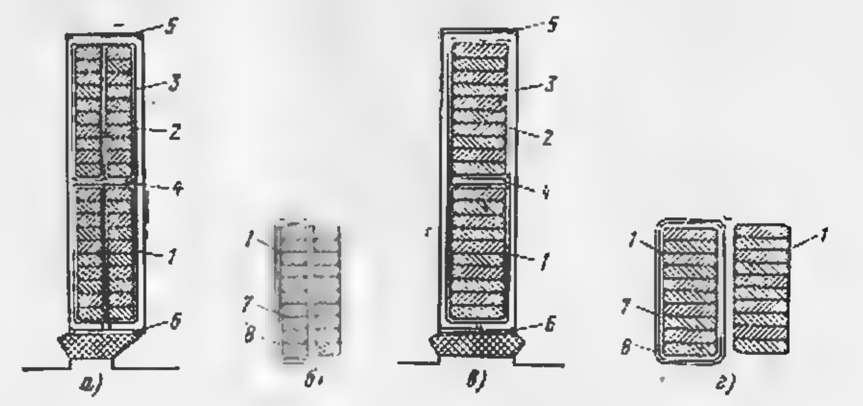
Конструкция изоляции обмотки статора двигателей с h=280÷355 мм приведена в табл. 9-4 для полуоткрытых и открытых прямоугольных пазов, в табл. 9-5 — для полузакрытых трапецеидальных пазов.

Двухслойная обмотка статора высоковольтных (на напряжение 6000 В) двигателей с h=400 мм и более укладывается в прямоугольные открытые пазы. Намотка «лодочек», их растяжка и опрессовка производятся аналогично тому, как это выполняется для низковольтных двигателей с жесткими полукатушками. Далее накладывается изоляция на пазовые и лобовые части катушек в соответствии с предусмотренной композицией, и катушки укладываются в пазы. Косые элементы лобовых частей снабжаются дистанционными распорками,

Таблица 9-4

Изоляция обмотки статора асинхронных двигателей

(пазы прямоугольные полуоткрытые и открытые; обмотка двухслойная с жесткими формованными полукатушками из прямоугольного эмалированного провода; $h = 280 \div 355$ мм; напряжение до 660 В)



Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка — Класс В	Класс F	Класс H	Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм, для пазов полуоткрытых, рис. а и б — по ширине	по высоте	открытых, рис. в и г — по ширине	по высоте
Пазовая, рис. а и в	1	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,2	0,2	0,1	0,2
	2	Бумага телефонная бакелизированная	Бумага фенилоновая лакированная		0,09	1,5 оборота	0,6	0,6	0,3	0,6
	3	Лакотканеслюдопласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	1	1,1	1,1	1,1	1,1
	4	Стеклотекстолит СТ	СТЭФ	СТК	1,0	1	—	1,0	—	1,0

Продолжение табл. 9-4

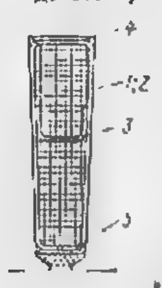
Часть обмотки			Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка			Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм, для пазов полуоткрытых, рис. а и б		открытых, рис. в и г	
				Класс В	Класс F	Класс H			по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая, рис. а и в			5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	—	0,5	—	0,5
			6	То же	То же	То же	0,5	1	—	0,5	—	0,5
			—	Допуск на укладку обмотки					0,3	0,6	0,3	0,6
			—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой и без высоты клина)					2,2	4,5	1,8	4,5
Лобовая, рис. б и г	Полукатушки группы	Крайние	—	Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной ЛЭС шириной 20 мм в двух местах			0,1	2,5 оборота	0,5	0,5	0,5	0,5
			1	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,1	0,1	0,1	0,1
			7	Стеклолакоткань: ЛСБ-105/120	ЛСП-130/155	ЛСК-155/180	0,15	1 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6
			8	Лента стеклянная ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4
			—	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)					1,6	1,6	1,6	1,6
		Средние	—	Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной ЛЭС шириной 20 мм в трех местах			0,1	2,5 оборота	0,5	0,5	0,5	0,5
			1	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,1	0,1	0,1	0,1
			—	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)					0,6	0,6	0,6	0,6

подвязываемыми к ним бандажным шнуром. В процессе укладки катушек в пазы лобовые части крепятся к бандажным кольцам (см. рис. 9-31), обеспечивающим механическую прочность обмотки при воздействии на нее больших электромагнитных усилий, возникающих при прямом включении двигателей в сеть. Прямолинейные вылеты лобовых частей (от сердечника до начала перехода к косым элементам) составляют примерно 45 мм на каждую сторону.

Таблица 9-5

Изоляция обмотки статора асинхронных двигателей

(пазы трапецеидальные полузакрытые: обмотка двухслойная всыпная концентрическая из круглого эмалированного провода; $h = 280 \div 315$ мм; $2p = 10, 12$; напряжение до 660 В)



Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка: Класс B	Класс F	Класс H	Толщина, мм: Класс B	Класс F	Класс H	Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм: Класс B	Класс F	Класс H
1*	Пленкосинтокартон ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
2**	Электронит			0,3	0,3	0,28	1	0,3	0,3	0,28
—	Общая толщина пазовой изоляции			0,55	0,58	0,56		0,55	0,58	0,56
3	Лакотканеслюдопласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	0,55	0,55	1	0,55	0,55	0,55
4	Пленкосинтокартон ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
5	То же	То же	То же	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28

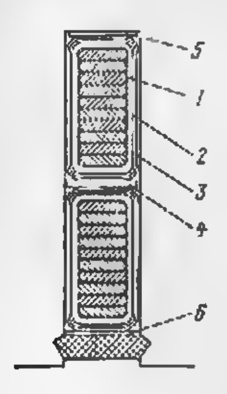
* К обмотке. ** К стенке паза.

Примечание. Междуфазные прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала, указанного в поз. 3.

Практическое выполнение двухслойных обмоток, имеющих разновитковые катушки, особенно при малых числах эффективных проводников, таких как 2+3; 3+4 и т. д., встречает при укладке в пазы серьезные затруднения из-за существенного различия катушек по высоте. Это затруднение устраняется тем, что прямолинейная (пазовая) сторона катушки, укладываемая во второй (верхний) слой, выполняется несколько более длинной, чем прямолинейная сторона, укладываемая в первый (нижний) слой. Отгиб лобовых частей обмотки

Изоляция обмотки статора асинхронных двигателей

(пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная с жесткими формованными катушками из прямоугольного провода с двусторонней толщиной изоляции не более 0,45 мм; изоляция непрерывная; $h = 400 \div 630$ мм; напряжение 6000 В)



Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: наименование, марка — Класс B	Материал: наименование, марка — Класс F	Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм — по ширине	Двусторонняя толщина изоляции, мм — по высоте
Пазовая	1	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ		0,14	4 вполнахлеста	2,24	4,48
	2	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ		0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12
	3	Лента стеклянная ЛЭС		0,1	1 встык	0,2	0,4
	—	Разбухание от пропитки: Компаунд класса B	Компаунд класса F	—	—	0,8	2,8
	4	Стеклотекстолит СТ	Стеклотекстолит СТЭФ	2,0	1	—	2,0
	5	То же	То же	0,5	1	—	0,5
	6	То же	То же	0,5	1	—	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки				0,3	0,6
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой и без высоты клина)				4,1	10,4
Лобовая	—	Общая толщина изоляции катушки (без витковой)				3,8	4,4

к станине обеспечивает пересечение косых элементов лобовых частей без налегания их одного на другой.

Конструкция изоляции обмотки статора двигателей с $h = 400 \div 630$ мм на напряжение 6000 В приведена в табл. 9-6.

В настоящее время для высоковольтных обмоток асинхронных двигателей все большее распространение находит изоляция, сокращенно именуемая «монолит». Основные сведения об этой изоляции приведены в § 9-1,*ж*.

е) Обмотки ротора

Короткозамкнутый ротор

Обмотка короткозамкнутых роторов двигателей с высотами оси вращения 50—355 мм выполняется заливкой пазов спрессованных сердечников алюминием марки А5 (ГОСТ 11069-74), причем в диапазоне высот 50—250 мм — на машинах для литья под давлением, а в диапазоне высот 280—355 мм — на вибрационных установках или статистическим способом с подачей металла снизу. Заодно с короткозамыкающими кольцами отливаются вентиляционные лопатки (рис. 9-20,*а, б*), число и размеры которых приведены в табл. 9-7 и на рис. 9-21. Между вентиляционными лопатками роторов двигателей

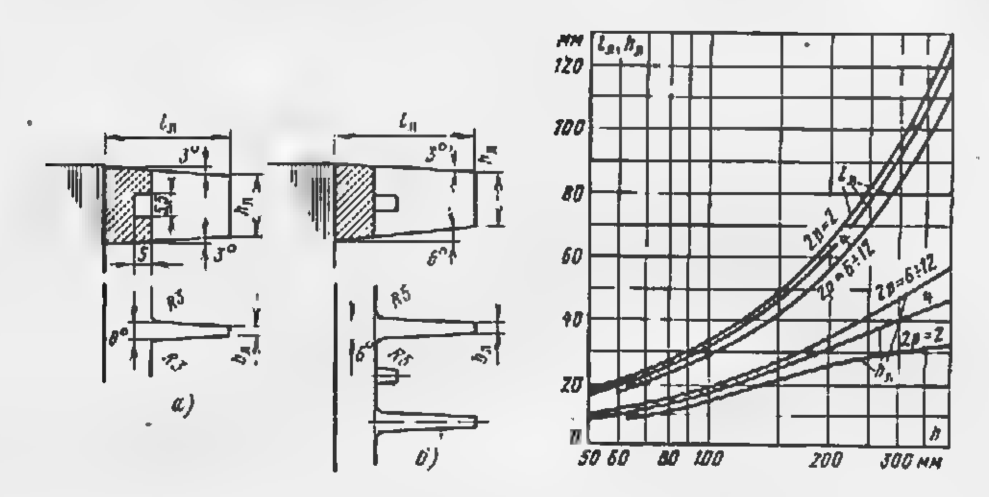


Рис. 9-20. Короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки ротора, залитого алюминием.

а — двигателей с $h=50\div132$ мм; *б* — двигателей с $h=160\div355$ мм.

Рис 9-21. Основные размеры вентиляционных лопаток ротора $(l_л, h_л)=f(h)$.

с $h\leq132$ мм предусматривают канавки (рис. 9-20,*а*) размерами примерно 5×5,5 мм, для размещения в них балансировочных грузов, которые крепятся зачеканкой краев канавок. У роторов двигателей с $h=112\div250$ мм между вентиляционными лопатками отливаются штыри (овального или круглого сечения, диаметром 5—10 мм) (рис 9-20,*б*); балансировочные грузы в виде стальных шайб крепятся на штырях, концы которых расклепываются.

Толщина лопатки $b_л$, мм, составляет примерно 2—5 мм в зависимости от высоты оси вращения двигателя (рис. 9-20). Размеры $l_л$ и $h_л$ на рис. 9-21 приведены в виде ориентировочных средних значений; длина лопатки $l_л$ может несколько изменяться в зависимости от изменения длины сердечника ротора при переходе от одного числа полюсов к другому при данной длине станины и глубине подшипниковых щитов; высота лопатки $h_л$ может изменяться в зависимости от выбираемой высоты короткозамыкающего кольца, которая, в свою очередь, зависит от глубины паза ротора.

Обмотка короткозамкнутых роторов двигателей с высотами оси вращения 400 мм и более выполняется в виде сварных клеток из алюминиевых шин стандартных размеров (рис. 9-22). В короткозамыкающих кольцах, изготовляемых из алюминиевой полосы, гнутой на ребро, фрезеруют канавки глубиной, равной примерно трем четвертям высоты стержня. Для уменьшения количества фрезеровок и сварок (вдвое) каждую пару соседних стержней размещают в одной общей канавке, для чего один из концов каждого стержня до укладки в паз изгибают; эти изгибы (при полной унификации заготовок стержней по размерам и форме) поочередно располагают с обоих торцов сердечника ротора, как показано на рис. 9-22. Прямолинейные (пазовые) части стержней, как правило, выступают за короткозамыкающие кольца, образуя по аналогии с конструкцией литой клетки вентиляционные лопатки и одновременно увеличивая поверхность охлаждения обмотки ротора. Находит применение также конструкция ротора с креплением стальных центробежных вентиляторов к нажимным шайбам (см. рис. 9-31).

Таблица 9-7

Рекомендуемые числа вентиляционных лопаток короткозамкнутых роторов, заливаемых алюминием

Высота оси вращения h, мм	Числа вентиляционных лопаток $N_л$ при числах полюсов			
	2	4, 6	8	10, 12
50—63	6	6	—	—
71—100	7	9	9	—
112—160	9	11	11	—
180	10	12	12	—
200—250	12	14	14	—
280, 315	17	22	22	22
355	19	22	22	22

Для предотвращения перемещений и вибраций каждый стержень чеканится по всей длине сердечника через верхнюю открытую часть паза. При чеканке алюминий стержней затекает в предусмотренные в пазах боковые канавки (см. рис. 14-12,*г*).

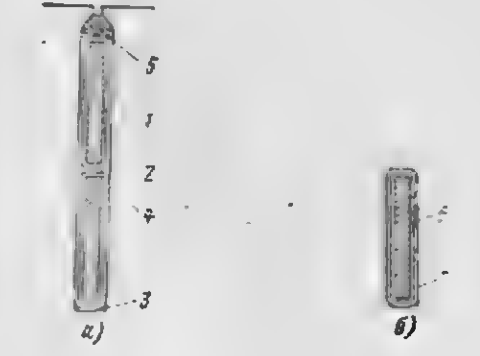
Фазный ротор

В фазных роторах двигателей с высотами оси вращения 280 мм и выше применяется волновая обмотка из медных стержней прямоугольного поперечного сечения. Изолированные медные стержни вставляют в прямоугольные полузакрытые пазы с торца, а лобовые части стержней изгибают для получения формы секции волновой обмотки. При этом стержни с одного конца формуют заранее, до вставки их в пазы. В каждом пазу располагают два стержня друг над другом, большей стороной по высоте паза. При сечениях более 80—100 мм² применяют два параллельно расположенных по ширине паза стержня, изолируемых вместе. Стержни имеют твердую изоляцию, выполняемую обкаткой и прессовкой (табл. 9-8). Концы стержней в лобовых частях соединяют между собой хомутиками, в которые, кроме того, впаивают вентиляционные лопатки (рис. 9-23) из листовой стали толщиною 0,8 мм. Пайку хомутиков выполняют оловянно-свинцовым припоем при

Таблица 9-8

Изоляция обмотки фазного ротора асинхронных двигателей

(пазы прямоугольные полузакрытые; обмотка двухслойная стержневая волновая; $h = 280 \div 355$ и $400 \div 630$ мм)



а) Пазовая часть обмотки б) Лобовая часть обмотки

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка			Толщина, мм		Напряжение до 750 В: Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм		Напряжение до 1200 В: Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Классы F, H	Класс B	Классы F, H	по ширине	по высоте	Класс B	Классы F, H	по ширине	по высоте
Пазовая, рис. а	1	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий-F	Синтофолий-H	0,15	0,16	4,5* оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	9,5* оборота	7,5 оборота	2,4	4,8
	2	Стеклолакоткань			0,15		1		0,3	0,3	1		0,3	0,3
		ЛСБ-105/120	ЛСП-130/155	ЛСК-155/180										
	3	Стеклотекстолит			0,5		1		—	0,5	1		—	0,5
		СТ	СТЭФ	СТК										

Продолжение табл. 9-8

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал					Напряжение до 750 В				Напряжение до 1200 В			
		Наименование, марка			Толщина, мм		Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции*, мм		Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Классы F, H	Класс B	Классы F, H	по ширине	по высоте	Класс B	Классы F, H	по ширине	по высоте
Пазовая, рис. *а*	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1		—	0,5	1		—	0,5
	5	То же	То же	То же	0,5		1		—	0,5	1		—	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки							0,3	0,5			0,3	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без высоты клина)							1,7	4,0			3,0	6,6
Лобовая, рис. *б*	6	Лента стеклослюдинитовая ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная ПМ (0,05×3=0,15 мм	0,15		1 вполнахлеста		0,6	0,6	2 вполнахлеста		1,2	1,2
	7	Лента стеклянная ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	2 вполнахлеста		0,6	0,6
	—	Общая толщина изоляции стержня в лобовой части							1,0	1,0			1,8	1,8

* С учетом усадки на 15—20%.

изоляции обмотки класса нагревостойкости B и твердым припоем при изоляции классов F и H. Волновые обмотки роторов обладают тем преимуществом в сравнении с петлевыми, что не требуют специальных междукатушечных соединений

При стержневой обмотке облегчается крепление лобовых частей бандажами. Бандажи, преимущественно из стеклянной нетканой бандажной ленты, прочно стягивают лобовые части обмотки, прижимая их к опорной поверхности обмоткодержателей, отливаемых заодно с нажимными шайбами ротора.

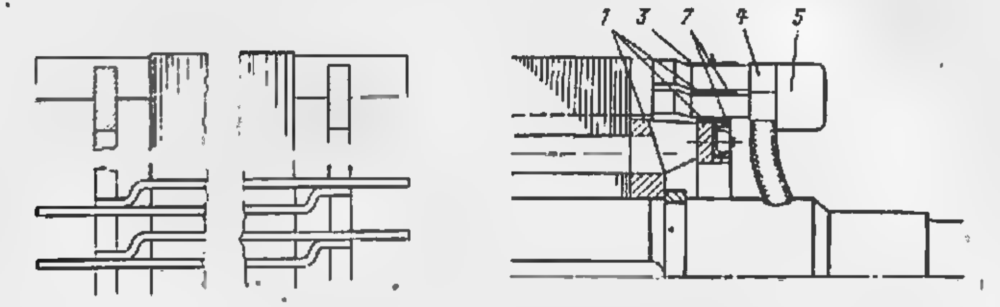


Рис. 9-22. Принципиальная конструкция сварной алюминиевой клетки ротора двигателей с $h>355$ мм.

Рис. 9-23. Конструкция лобовой части обмотки фазного ротора.

1 — стеклослюдопласт ГИП ЛСП ЛСЛ 0,55 мм, 2 — лента стеклянная ЛЭС — 0,2×20 мм; 3 — лента стеклянная нетканая бандажная ЛСБ — 0,2×20 мм, 4 — стеклолакоткань ЛСП — 0,15 мм и лента стеклянная ЛЭС — 0,2×20 мм, 5 — стальная вентиляционная лопатка 0,8 мм

Механический расчет стеклобандажей для лобовых частей обмотки фазного ротора выполняется по методике, приведенной в § 9-4,ж для якоря двигателя постоянного тока.

Конструкция изоляции обмотки фазного ротора двигателей с $h=$ $=280\div355$ и $400\div630$ мм приведена в табл 9-8.

ж) Токосъемное устройство фазных роторов

Токосъемное устройство двигателей с фазным ротором целесообразно выполнять за подшипниковым щитом в виде вынесенной коробки контактных колец (рис. 9-24,*а*). Это гарантирует унификацию обоих подшипниковых щитов двигателя и устраняет опасность попадания на обмотки щеточной пыли. Коробка контактных колец крепится к втулке подшипникового щита и выполняется либо литой из чугуна (двигатели с $h=280\div355$ мм), либо стальной сварной (двигатели с $h>355$ мм). Коробка закрывается съемным сварно-штампованным кожухом из листовой стали, имеющим отверстия для входа охлаждающего воздуха. Отверстия обычно защищают выдавленными жалюзи. В нижней части цилиндрической стенки кожуха имеются отверстия для выхода воздуха; в боковой части стенки коробки — выводное устройство в виде коробки выводов. Корпус коробки контактных колец должен при снятии кожуха обеспечивать свободный доступ к щеткодержателям и контактным кольцам для их обслуживания.

Диаметр контактных колец выбирается меньше наружного диаметра шарикоподшипника, поэтому коробка контактных колец и подшипниковый щит электродвигателя могут быть при разборке сняты

без предварительного съема контактных колец с вала, т. е. без опасности нарушения их центровки при повторной сборке.

Щеткодержатели обычно применяются штампованные (клепаные) или же литые из алюминиевого сплава (сдвоенные) и крепятся на изолированном стержне. Материал контактных колец зависит от мощности двигателя (табл. 9-9). Щетки — металлографитные, марки МГ4.

Таблица 9-9

Мощность двигателя, кВт	Контактные кольца, материал
До 100	Кованые медные
Свыше 100	Кованые стальные или литые из чугуна

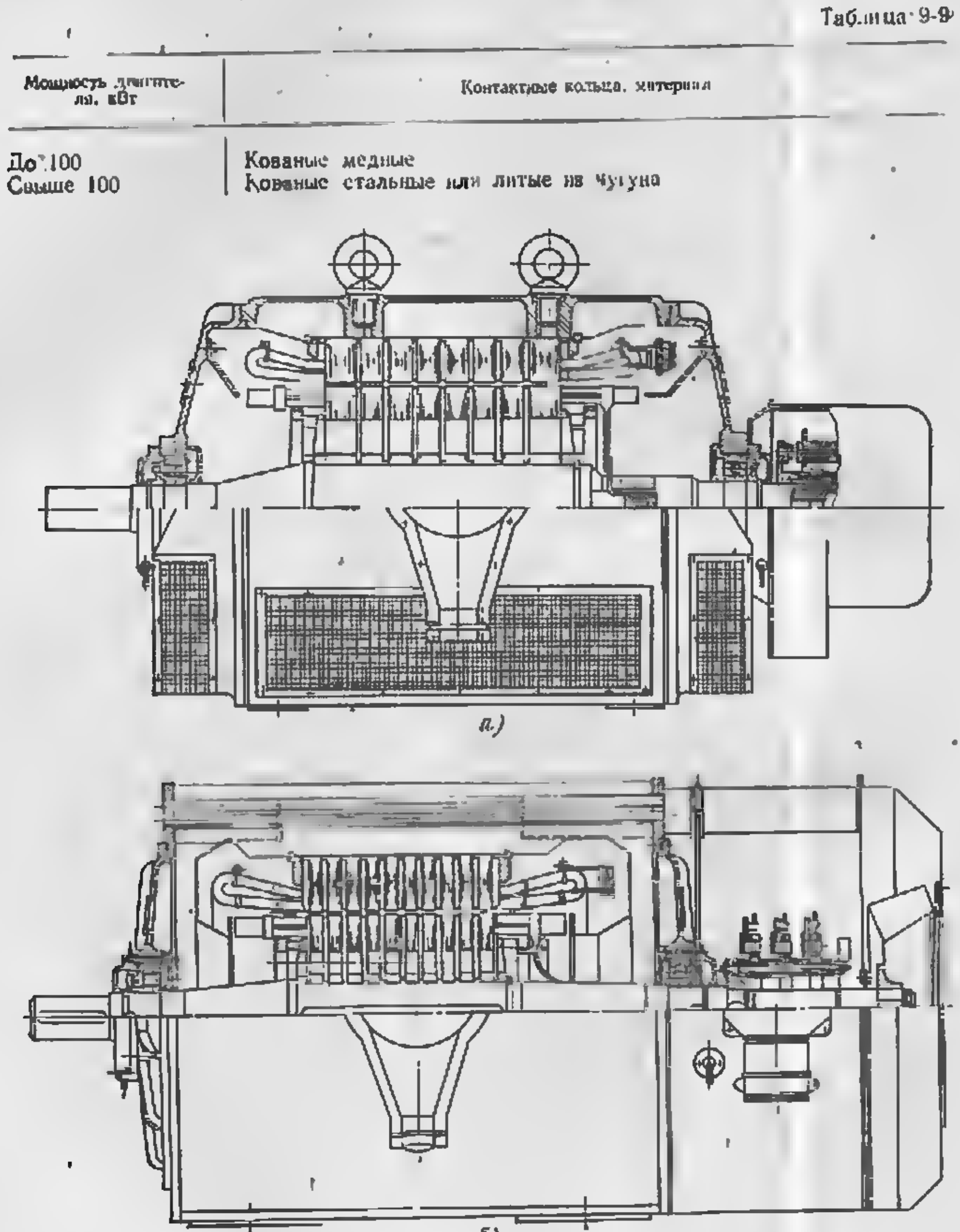


Рис. 9-24. Двигатель с фазным ротором.

а — в исполнении IP23 с вынесенной за подшипниковый щит коробкой контактных колец. *б* — в исполнении IP44 с токосъемным устройством на стороне вентилятора, $h>355$ мм

В двигателях со степенью защиты IP44 конструкция узла контактных колец усложняется из-за наружного цикла вентиляции. Наиболее целесообразно располагать контактные кольца между вентилятором и подшипником, как это показано, например, на рис. 9-24,б для двигателей с высотами оси вращения более 355 мм. Здесь для защиты к охлаждения колец узел закрыт двойным кожухом, между стенками которого проходит воздух, направляемый в охлаждающие трубки станины. Окна в кожухе, также состоящие из двух стенок, позволяют производить замену щеток без разборки узла.

з) Вентиляторы и кожухи

Электродвигатели со степенью защиты IP44 и способами охлаждения IC0151, IC0141 имеют наружный центробежный вентилятор с прямыми лопатками, насаженный на конец вала со стороны, противоположной приводу. Для направления охлаждающего воздуха вентилятор у двигателей с $h \leq 355$ мм закрыт штампованным или сварно-штампованным кожухом из листовой стали толщиною 1—2 мм (в зависимости от высоты оси вращения двигателя). Кожух имеет на торце входные отверстия, размеры которых должны удовлетворять требова-

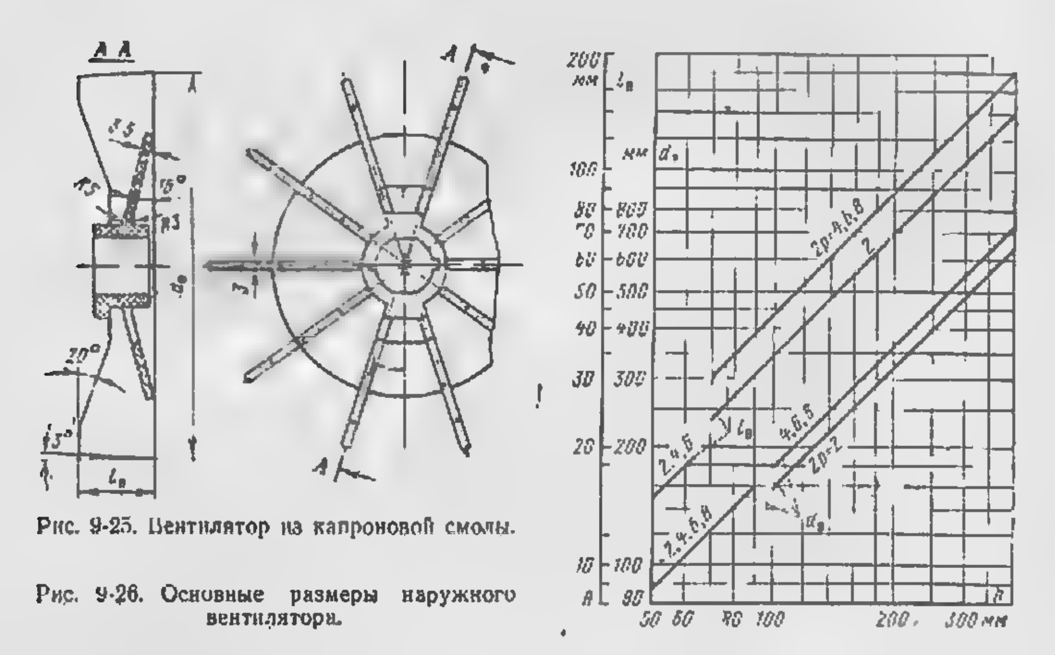


Рис. 9-25. Вентилятор из капроновой смолы.

Рис. 9-26. Основные размеры наружного вентилятора.

ниям степени защиты IP20 согласно ГОСТ 14254-69 (не превышать 12 мм); отверстия могут быть любой формы в зависимости от требований технической эстетики, а перемычки между ними не должны представлять существенного препятствия для входа воздуха. Кожух крепится обычно к ушкам подшипникового щита. В своей нижней части кожух обычно имеет уплощенный участок (рис. 9-27) для обеспечения расположения его несколько выше опорной плоскости лап. У двигателей с $h > 355$ мм кожух, закрывающий вентилятор, выполняется сварным, аналогичным по конструкции кожуху двигателей меньших высот оси вращения (см. рис. 9-3,н).

Вентиляторы двигателей с $h=50 \div 132$ мм целесообразно выполнить из пластмассы (например, из капроновой смолы) или же, начиная с $h=71$ мм и до $h=355$ мм, из алюминиевого сплава марки АЛ9В (ГОСТ 2685-75). Вентиляторы двигателей с $h>355$ мм выполняются стальными клепаными; они крепятся болтами к чугунной втулке, насаженной на конец вала со шпонкой. Вентиляторы из пластмассы крепятся на валу при помощи двух диаметрально расположенных лысок; вентиляторы из алюминиевого сплава двигателей с $h=71 \div 132$ мм имеют во втулке радиальный разрез, стягиваемый на валу болтом; с $h=160 \div 355$ мм — залитую стальную втулку и насаживаются на вал со шпонкой.

Таблица 9-10

Рекомендуемые числа лопаток литых вентиляторов

Высота оси вращения h, мм	Число лопаток $N_{\text{в}}$ при числах полюсов		Высота оси вращения h, мм	Число лопаток $N_{\text{в}}$ при числах полосов	
	2	4, 6, 8		2	4, 6, 8
50—63	4	4	160—250	5	8
71—100	10	10	280—355	6	9
112, 132	5	8			

На рис. 9-25 показан вентилятор, выполняемый из капроновой смолы; предварительно нагретый в кипящей воде, он насаживается на конец вала и запирается пружинной шайбой.

Число лопаток и основные размеры вентиляторов (наружный диаметр лопаток $d_{\text{в}}$ и наибольшая ширина лопатки $l_{\text{в}}$) приведены в табл. 9-10 и на рис. 9-26 в зависимости от высоты оси вращения.

и) Вводное устройство

Вводное устройство в соответствии с рекомендациями Публикации 72 МЭК может занимать любое место на дуге сектора станины, начиная от верха ее и до такого положения, когда ось вводного устройства на 10° ниже горизонтали. Практически у двигателей с $h \leqslant 250$ мм вводное устройство располагают вверху станины, а у двигателей с $h \geqslant 280$ мм — сбоку, справа, если смотреть на двигатель со стороны выступающего конца вала. Место положения вводного устройства на станине вдоль оси двигателя рекомендациями МЭК не регламентировано.

Низковольтные двигатели с $h \leqslant 250$ мм общего назначения обычно имеют вводное устройство с панелью выводов и одним штуцером (исполнение К-3-I), а двигатели с $h=280 \div 355$ мм — с панелью выводов и двумя штуцерами (исполнение К-3-II); штуцера предназначены для подсоединения гибкого металлического рукава и кабелей с медными или алюминиевыми жилами с ободочкой из резины или пластиков.

Вводное устройство двигателей с $h=50 \div 100$ мм должно допускать разворот с фиксацией через каждые 90°, а двигателей с $h=112 \div 355$ мм — через 180°.

Высоковольтные двигатели с $h=400$ мм выполняются с вводным устройством, расположенным сбоку станины. Панель имеет четыре изолятора, на которых крепятся выводы трех фаз обмотки и выводы

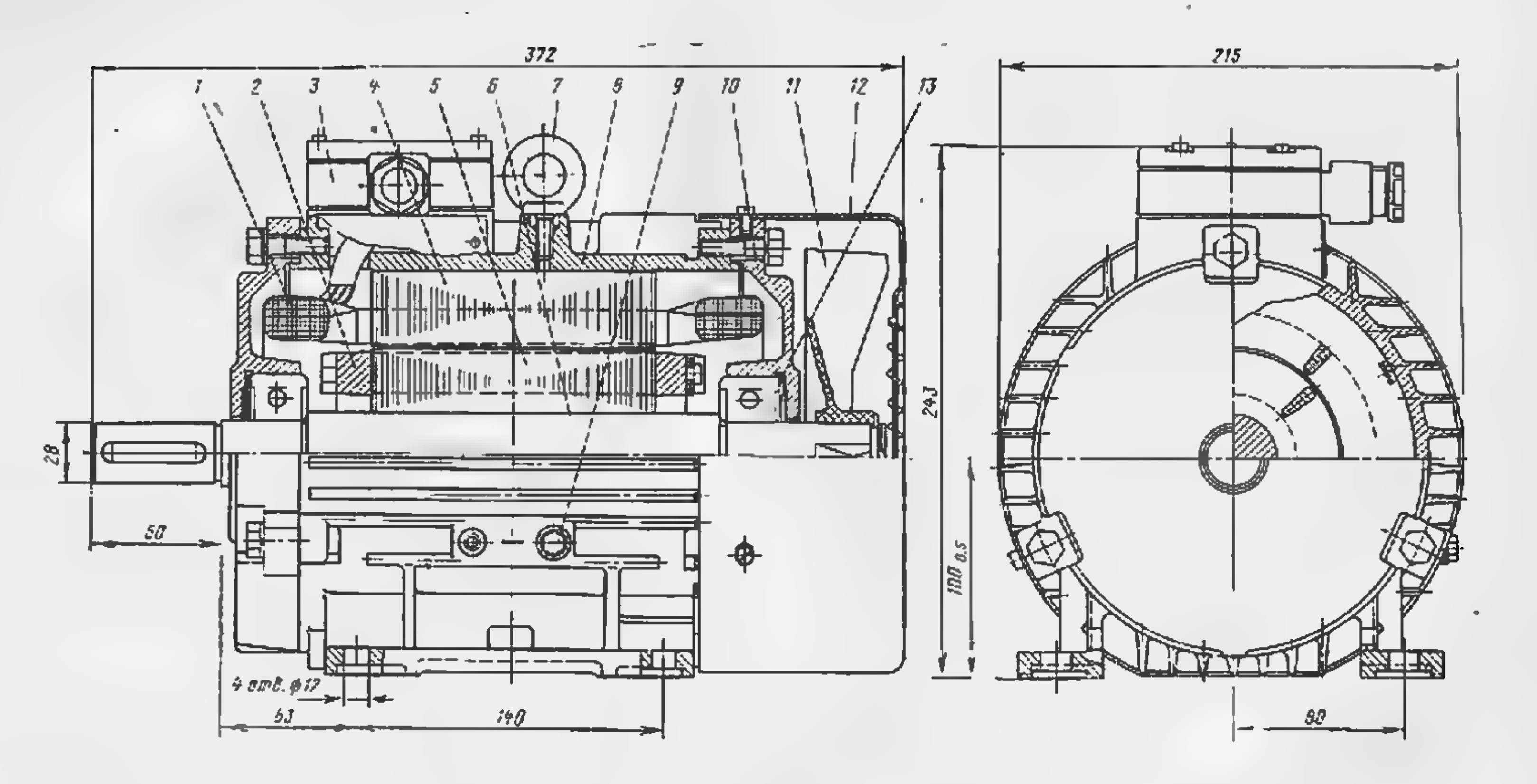


Рис. 9.27. Общий вид асинхронного короткозамкнутого двигателя с высотой оси вращения 100 мм; степень защиты IP44, способ охлаждения IC0141; 4,0 кВт, 220/380 В, 2p=4.

1 — обмотка статора, *2* — обмотка ротора, *3* — вводное устройство, *4* — сердечник статора, *5* — сердечник ротора, *6* — вал; *7* — рым-болт; *8* — станина; *9* — болт заземления; *10* — щит подшипниковый; *11* — вентилятор наружный; *12* — кожух наружного вентилятора; *13* — шайба пружинящая.

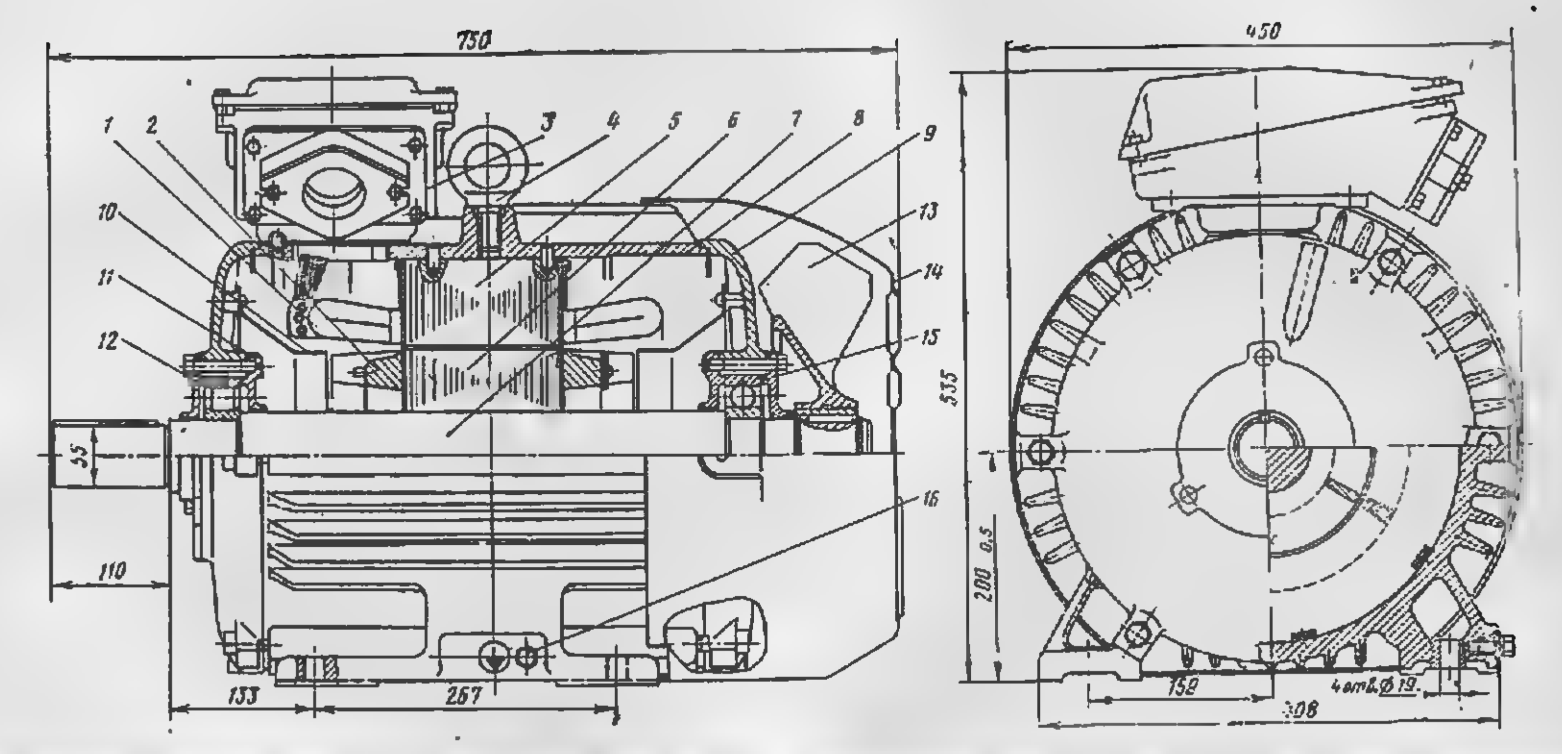


Рис. 9-28. Общий вид асинхронного короткозамкнутого двигателя с $h=200$ мм; степень защиты IP44; способ охлаждения IC0141; 37 кВт, 220/380 В, $2p=2$.

1 — обмотка статора, 2 — обмотка ротора, 3 — вводное устройство; 4 — рым-болт; 5 — сердечник статора, 6 — сердечник ротора; 7 — вал; 8 — станина; 9 — щит подшипниковый; 10 — щиток, направляющий воздух; 11 — крышка подшипниковая внутренняя; 12 — крышка подшипниковая наружная; 13 — вентилятор наружный, 14 — кожух наружного вентилятора; 15 — шайба пружинящая; 16 — болт заземления.

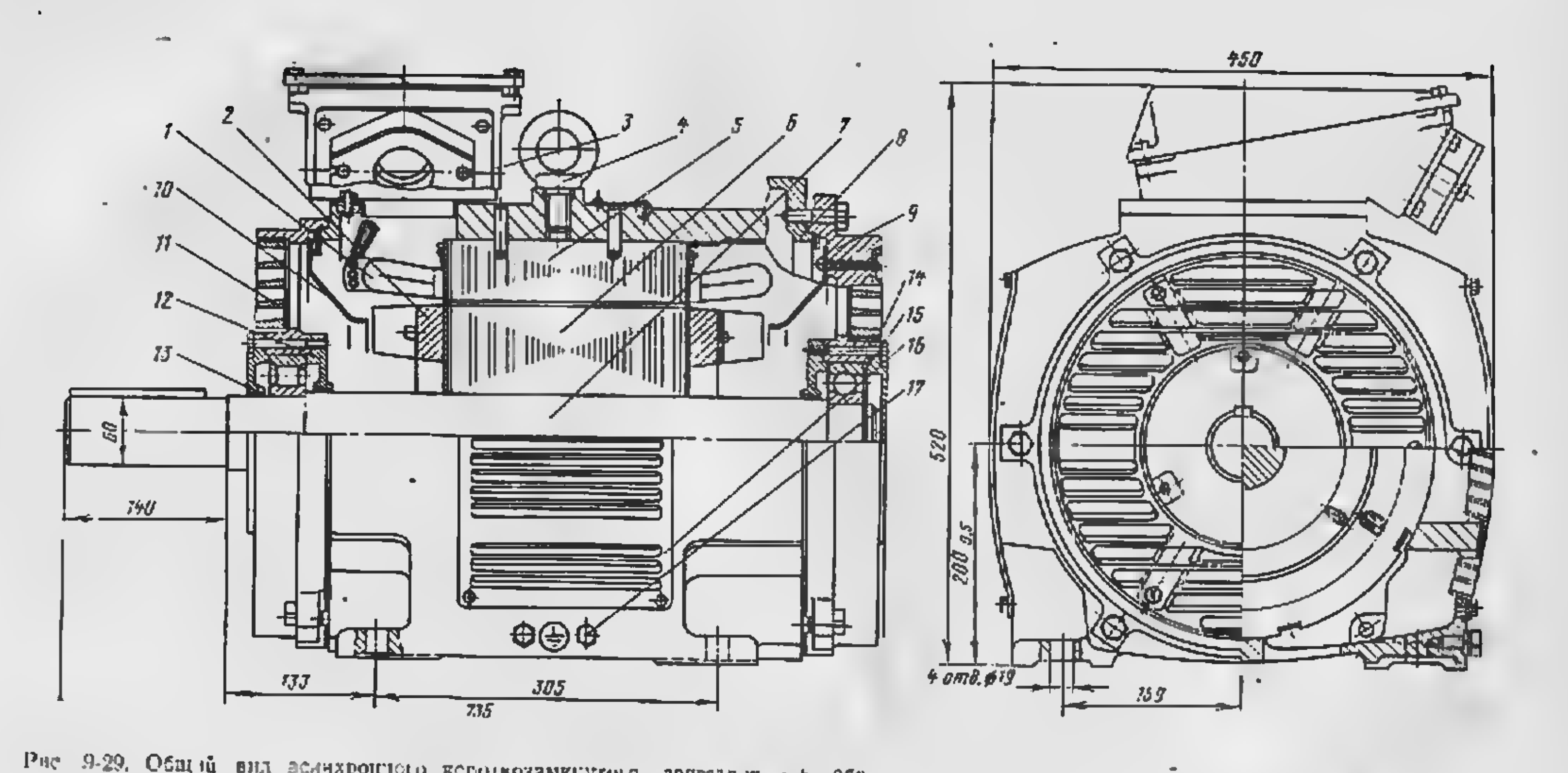


Рис. 9-29. Общий вид асинхронного короткозамкнутого двигателя с $h=200$ мм; степень защиты IP23, способ охлаждения IC01; 55 кВт, 220/380 В, $2p=4$.

1 — обмотка статора; 2 — обмотка ротора; 3 — вводное устройство; 4 — рым-болт; 5 — сердечник статора; 6 — сердечник ротора; 7 — вал; 8 — станина; 9 — щит подшипниковый; 10 — щиток, направляющий воздух; 11 — жалюзи на входе воздуха; 12 — крышка подшипниковая внутренняя; 13 — крышка подшипниковая наружная; 14 — крышка подшипниковая наружная; 15 — шайба пружинящая; 16 — жалюзи на выходе воздуха; 17 — болт заземления

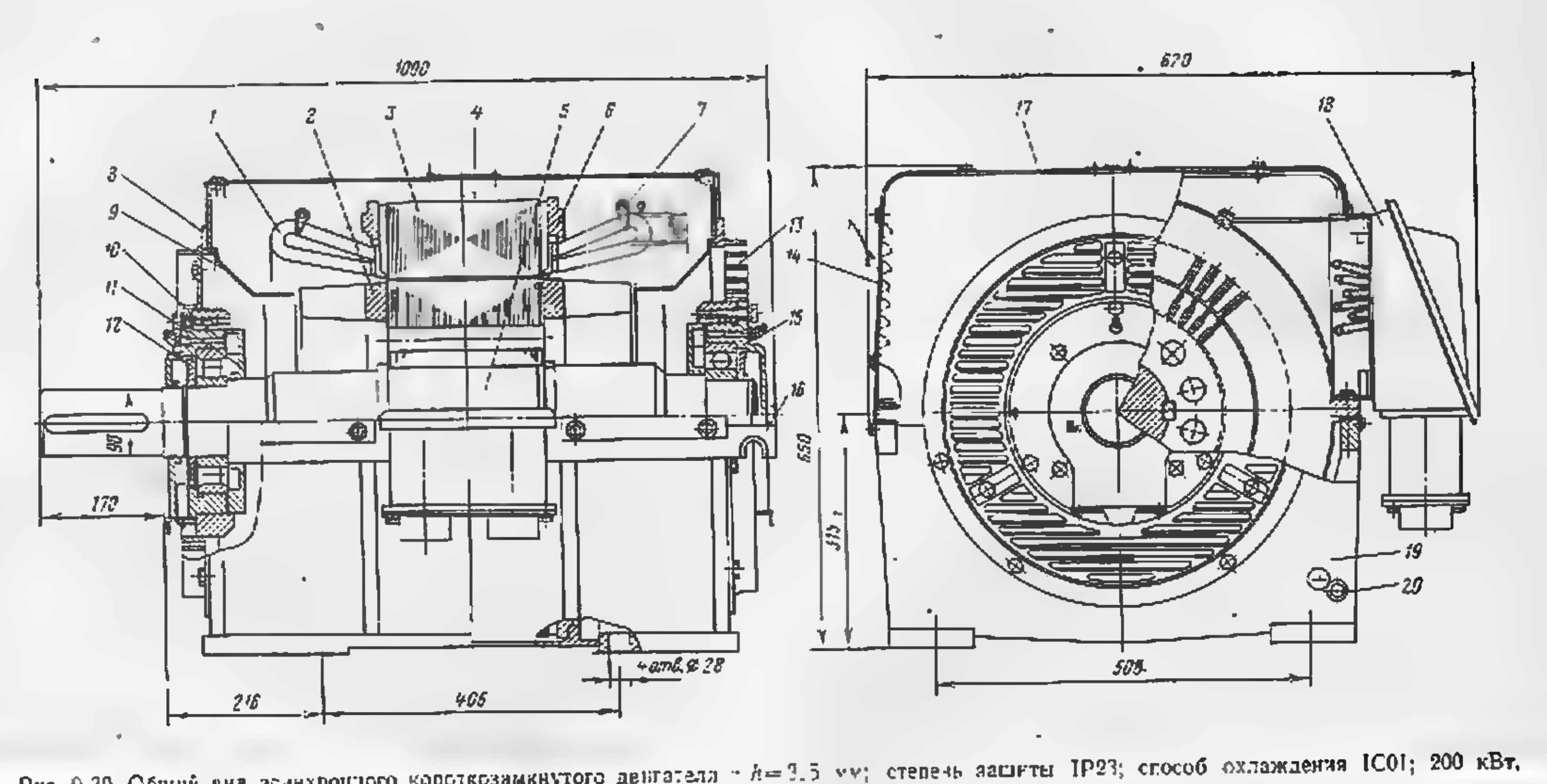


Рис. 9-30. Общий вид асинхронного короткозамкнутого двигателя $h = 355$ мм; степень защиты IP23; способ охлаждения IC01; 200 кВт, 380/660 В. $2p=4$.

1 — обмотка статора; 2 — обмотка ротора; 3 — сердечник статора; 4 — сердечник ротора; 5 — вал; 6 — шайба нажимная с заточкой для посадки сердечника в станину; 7 — кольцо бандажное; 8 — щит подшипниковый; 9 — щиток, направляющий воздух; 10 — капсула подшипника со стороны выступающего конца вала; 11 — крышка подшипниковая внутренняя; 12 — шайба, сбрасывающая отработанную смазку; 13 — жалюзи на входе воздуха; 14 — жалюзи на выходе воздуха; 15 — капсула подшипника со стороны, обратной выступающему концу вала; 16 — крюк для подъема двигателя (4 шт.); 17 — кожух; 18 — вводное устройство; 19 — полустанина; 20 — болт заземления.

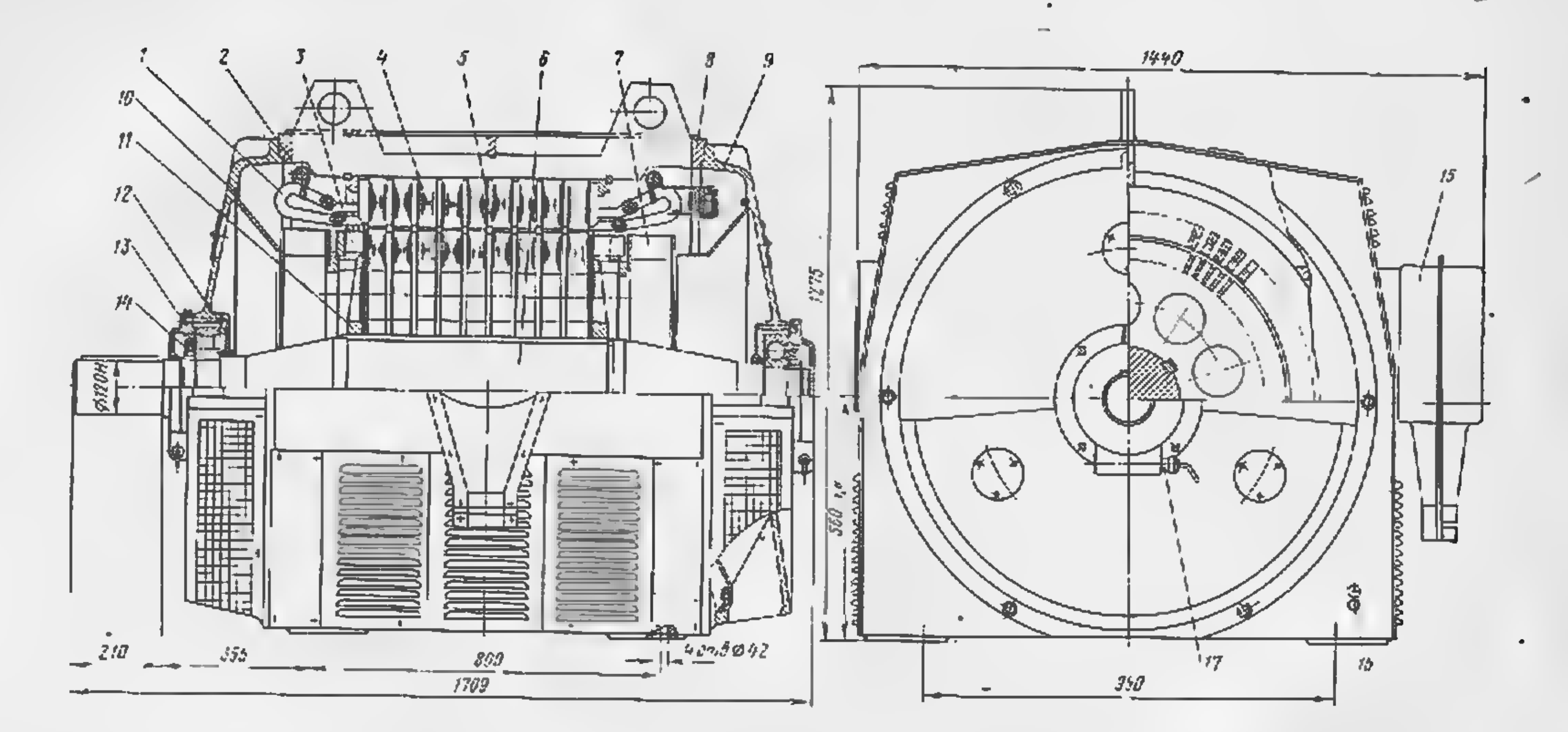


Рис. 9-31. Общий вид асинхронного короткозамкнутого двигателя с $h=560$ мм; степень защиты IP23; способ охлаждения IC01. 630 кВт, 6000 В, $2p=8$.

1 — обмотка статора; 2 — нажимное кольцо; 3 — обмотка ротора; 4 — сердечник статора; 5 — сердечник ротора; 6 — вал; 7 — лопатка; 8 — станина; 9 — щит подшипниковый; 10 — щиток, направляющий воздух; 11 — шайба нажимная; 12 — крышка подшипниковая внутренняя; 13 — крышка подшипниковая наружная; 14 — шайба, сбрасывающая отработанную смазку; 15 — вводное устройство; 16 — болт заземления; 17 — трубка для сбора и удаления отработанной смазки

нулевой точки. К нулевой точке подводятся кабели всех трех фаз, что даст возможность при профилактических осмотрах и ремонтах разъединять фазы обмотки для проверки сопротивления изоляции и ее электрической прочности.

Степень защиты вводного устройства должна соответствовать степени защиты электродвигателя (ГОСТ 17494-72). Между корпусом вводного устройства и станиной, а также между корпусом и крышкой ставится резиновое уплотнение. У двигателей с высотами оси вращения до 100 мм корпус и крышку вводного устройства можно выполнять из пластмассы; у двигателей с высотами оси вращения до 250 мм — из вторичных алюминиевых сплавов, а у двигателей с большими высотами оси вращения — из чугуна или стали.

Особое внимание при проектировании вводных устройств должно быть обращено на уменьшение трудоемкости сборочных операций, так как часто у существующих конструкций вводных устройств трудоемкость сборочных операций соизмерима с трудоемкостью сборки самого двигателя. Особое внимание следует обращать также на достижение наибольшего удобства потребителя и наименьшей трудоемкости операции подключения подводящего кабеля при монтаже двигателя на месте установки

Примеры конструкции асинхронных двигателей различных исполнений и высот оси вращения приведены на рис. 9-27—9-31.

9-4. ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) Валы и их механический расчет

Конфигурацию вала определяют при конструктивной разработке двигателя, принимая за базу диаметр и длину выступающего конца вала, которые выбирают в соответствии с рекомендациями МЭК (см. приложение 4) по наибольшему моменту вращения при номинальном режиме работы. Второй базой является внутренний диаметр листов якоря D_2, принятый при определении основных размеров магнитопровода. При этом вал проектируют с минимальным возможным числом переходов от одной ступени к другой для снижения трудоемкости механической обработки.

Двигатели с высотами оси вращения до 315 мм имеют выступающий конец вала цилиндрической формы, а двигатели с высотами вращения более 315 мм, работающие в относительно тяжелых условиях с резкими перегрузками, могут иметь конец вала конической формы; в некоторых случаях такие двигатели имеют два конических выступающих конца вала для обеспечения бесперебойной эксплуатации в случае поломки одного из них.

Для фиксации положения сердечника якоря на валу предусматривают упорный выступ, высота которого должна быть не менее $0,01\,D_2+1$ мм. На выступающем конце и частях вала, предназначенных под посадку сердечника якоря, коллектора, вентилятора, предусматривают шпоночные пазы.

Конструкцию вала двигателей с различными высотами оси вращения можно видеть на рис. 9-36—9-39.

Основные требования к прочности и жесткости вала, а также к критической частоте вращения аналогичны изложенным в § 9-3,в для валов асинхронных двигателей. Методика механического расчета вала

также соответствует приведенной в § 9-3,в со следующими добавлениями и изменениями:

1) дополнительно учитывают прогиб вала под серединой сердечника якоря, от силы тяжести коллектора $P_\text{к}$, путем прибавления к P_2 значения 0,85 $P_\text{к}$. Приближенное значение силы тяжести $P_\text{к}$, Н,

$$P_\text{к} = 60\, D^2_\text{к} l_\text{к} \cdot 10^{-6},$$

где $D_\text{к}$ и $l_\text{к}$ — соответственно наружный диаметр и длина активной части коллектора, мм;

2) начальную силу магнитного притяжения, Н, вместо (9-10) и (9-11) вычисляют по формулам:

при числе полюсов $2p=2$

$$P_\text{м} = 0{,}13 D_\text{н2} l_2 \frac{e_0}{\delta} \tag{9-26}$$

и при числе полюсов $2p>2$

$$P_\text{м} = 0{,}2 D_\text{н2} l_2 \frac{e_0}{\delta}, \tag{9-27}$$

где $D_\text{н2}$ и l_2 — соответственно наружный диаметр и конструктивная длина сердечника якоря, мм;

3) суммарный прогиб вала не должен превышать 12% значения δ.

б) Сердечники якорей

При применении для сердечников якорей стали марки 2013 листы якоря после штамповки и термической обработки покрывают лаком; при использовании стали марок 2211, 2312 и 2411, поставляемой уже термически обработанной, листы лакируют после штамповки и снятия заусенцев.

По торцам сердечника якоря во избежание «распушения» располагают крайние листы, обычно образуемые точечной сваркой нескольких листов толщиною 0,5 мм. Спрессованный под давлением около $1{,}5 \cdot 10^6$ Па между двумя нажимными шайбами сердечник якоря запирается либо втулкой, насаженной на вал с горячей посадкой, либо пружинным кольцом, заложенным в кольцевую канавку вала. У якорей двигателей с высотами оси вращения более 200 мм нажимные шайбы снабжены обмоткодержателями (см. рис. 9-37), которые служат опорой для лобовых частей обмотки якоря. Обмоткодержатели двигателей с высотами оси вращения до 315 мм обычно выполняют литыми чугунными, а при бо́льших высотах — стальными сварными.

Сердечники якорей со всыпной обмоткой, не имеющие обмоткодержателей, изолируют по торцам текстолитовыми (при классе нагревостойкости изоляции В) или стеклотекстолитовыми (при классах F и Н) шайбами; изолируют также вал в местах возможного соприкосновения с ним обмотки. Более прогрессивным является применение для указанных целей прессованных из пластмассы втулок. Обмоткодержатели, применяемые для якорей с открытыми пазами, изолируют аналогично.

в) Коллекторы

Коллектор является одной из наиболее сложных сборочных единиц двигателей постоянного тока, так как он собирается из большого числа медных пластин трапецеидального поперечного сечения, чере-

дующихся с миканитовыми или слюдопластовыми прокладками; при этом конструкция коллектора должна обеспечивать сохранение его цилиндрической формы во всех режимах работы двигателя, сопровождающихся действием центробежных сил и температурных удлинений.

Основными способами крепления коллектора являются:

1) крепление конструкционной пластмассой;

2) крепление нажимными конусными фланцами.

Крепление пластмассой получило широкое распространение в коллекторах с наружным диаметром $D_к$ до 200–250 мм. Коллекторы этого типа имеют значительно меньшие трудоемкость изготовления и себестоимость по сравнению со сборными за счет отсутствия механической обработки крепящих деталей и пластин коллекторов. Для большей надежности посадки коллекторов на вал двигателя их снабжают стальной втулкой, а для повышения механической прочности в пластмассе размещают армирующие стальные кольца (рис. 9-32).



Рис. 9-32. Коллектор с креплением пластмассой.

1 — втулка стальная; 2 — пластмасса; 3 — кольцо армирующее; 4 — пластина коллектора

Рис. 9-33. Схема арочного крепления коллекторных пластин.

Слабым местом в эксплуатации таких коллекторов является возможное прогорание пластмассы на стыке с медью на внешнем торце при наличии в этих местах зазоров. В зазорах и на торцевых поверхностях коллекторов оседает угольная пыль, попадают смазка, грязь и влага, в результате чего образуются проводящие мостики, которые, постепенно разрастаясь, приводят к аварии коллектора, поэтому стык меди и пластмассы необходимо закрывать стеклобандажом. Недостатком коллектора на пластмассе является также плохое охлаждение корпуса из-за низкой теплопроводности и большей толщины изоляции.

Для крепления коллектора может применяться пластмасса марок К6 или АГ-4с.

Коллекторы с креплением нажимными конусными фланцами имеют арочную конструкцию (рис. 9-33), при которой нажим на коллекторные пластины (сила P_1) осуществляется через ласточкин хвост. Коллекторы с наружным диаметром $D_к \leq 140$ мм собирают на чугунной втулке, насаживаемой на вал, и скрепляют посредством нажимных фланцев и кольцевой гайки. Эти коллекторы обычно не имеют аксиальных вентиляционных каналов из-за отсутствия достаточного места для их размещения. Концы секции обмотки якоря закладывают во выфрезерованные пазы коллекторных пластин и припаивают (рис. 9-35).

Коллекторы с $D_к > 140$ мм (рис. 9-37) собирают на чугунной или стальной втулке, насаживаемой на вал, и крепят нажимными фланцами и кольцевой гайкой; при большой длине коллектора вместо гайки может применяться крепление шпильками. Коллекторы имеют аксиальные каналы для прохода охлаждающего воздуха. Концы секций обмотки якоря соединяют с коллекторными пластинами петушками,

изготовленными из отожженной меди. Петушки закладывают в выфрезерованные в коллекторных пластинах канавки, а затем припаивают после сборки коллектора; для повышения надежности в ряде случаев петушки дополнительно приклепывают одной или двумя заклепками к коллекторным пластинам до сборки коллектора.

Коллекторные пластины изолируют от втулки и нажимных фланцев миканитовыми или слюдинитовыми цилиндром и манжетами. Конструкция переднего нажимного фланца коллектора должна предусматривать размещение балансировочных грузиков.

Предварительное значение высоты коллекторной пластины, мм,

$$h_к = 12{,}5\sqrt{D_к} - 10; \qquad (9\text{-}28)$$

в эту высоту включен припуск на износ в эксплуатации с соответствующими проточками коллектора, равный 20% высоты пластины.

Для достижения монолитности коллектора его необходимо запрессовать со средним удельным давлением между коллекторными пластинами, Па,

$$p = \left[6 + 0{,}5\left(\frac{n_р}{1000}\cdot\frac{D_к}{100}\right)^{3/2}\right]\cdot 10^6, \qquad (9\text{-}29)$$

где $n_р$ — максимальная (угонная) частота вращения, об/мин, равная 1,2 наибольшей частоты вращения.

Механический расчет коллекторов целесообразно проводить в соответствии с методикой, приведенной в [Л. 1].

г) Станины

У двигателей постоянного тока станина, выполняя роль корпуса двигателя, одновременно является частью магнитной системы; поэтому она изготовляется из стали, обладающей достаточно высокой магнитной проницаемостью.

У двигателей с высотами оси вращения 80—200 мм станину обычно выполняют из отрезков цельнотянутых труб, что значительно увеличивает ее технологичность. У двигателей с высотами оси вращения 225—315 мм станины сварные, из толстолистового проката. Если двигатели нефланцевого исполнения, то лапы двигателя вырезают из толстолистового проката и приваривают к станине. Расположение лап при учете стандартизованных расстояний между отверстиями в них должно обеспечивать возможность свободной постановки болтов, крепящих станину к фундаменту (см. рис. 9-35).

У двигателей с высотами оси вращения 355—500 мм станины целесообразно выполнять в виде шихтованного сердечника восьмигранной формы с приваренными к нему опорными частями, которые изготовляются из листового стального проката; станины неразъемные. Сердечник собирается из штампованных сегментов электротехнической стали толщиной 1 мм (рис. 9-38); болты, стягивающие сердечник, изолируются. Восьмигранная форма станины позволяет более компактно разместить во внутреннем пространстве двигателя главные и добавочные полюсы с обмотками и тем самым уменьшить габариты и высоту оси вращения двигателя.

В массивных станинах предусматривают кольцевые центрирующие заточки (замки) для посадки подшипниковых щитов. Заточки могут быть расположены по наружному или по внутреннему диаметру станины. Подшипниковый щит крепят к торцевой поверхности станины болтами.

Получаемые при электромагнитном расчете площади поперечного сечения станины всегда обеспечивают ее достаточную прочность и жесткость. В некоторых случаях, для обеспечения большей жесткости подшипниковых щитов, особенно со стороны коллектора, станину выполняют удлиненной, причем части станины, развитые в обе стороны или только в сторону коллектора, делают меньшей толщины.

У станин двигателей с высотами оси вращения 355—500 мм следует предусматривать специальные приварные кольца или сегменты с нарезанными отверстиями для крепления подшипниковых щитов болтами.

Вводное устройство двигателей с высотами оси вращения 80—200 мм расположено сверху, так как при этом обеспечивается возможность подвода питающего кабеля с правой или левой стороны двигателя. У двигателей с высотами оси вращения более 200 мм вводное устройство обычно располагается сбоку станины. Станина, если она не удлиненная, выполняется симметричной, с расположением отверстий для крепления полюсов посредине осевой длины; при этом вводное устройство может быть установлено, в зависимости от требований, с правой или левой сторон двигателя.

Станины двигателей с массой, превышающей 30 кг, снабжают устройством для подъема и транспортировки, рассчитанным на массу двигателя. Для этой цели применяют подъемные рым-болты (см. приложение 11), ввертываемые в нарезанные отверстия (см. рис. 9-36), или приварные проушины с отверстиями для подъемных крюков (рис. 9-35).

Двигатели должны иметь наружные зажимы для заземления корпуса, снабженные устройством для предупреждения самоотвинчивания. Эти зажимы обычно располагают вблизи опорных лап или на фланцевом щите у двигателей с фланцевым креплением. Кроме того, зажим заземления должен быть также в коробке выводов.

д) Полюсы главные и добавочные

Выполнение главных полюсов

Главные полюсы выполняют из штампованных неизолированных листов электротехнической стали толщиной 1 мм. Их спрессовывают под давлением 2,0—2,5 МПа (20—25 кгс/см²) и скрепляют стальными заклепками. Заклепки располагают равномерно; общая площадь поперечного сечения заклепок должна составлять около 2% общей площади поперечного сечения сердечника полюса, но при этом диаметр заклепок должен быть не менее 4 мм, а число их — не менее четырех.

Крайние листы полюса выполняют утолщенными до 5—10 мм во избежание «распушения» листов и для утопления головок заклепок. Углы сердечников полюсов закругляют или фрезеруют, особенно при выполнении катушек из меди, намотанной на ребро. В наконечниках полюсов могут быть предусмотрены пазы для компенсационной обмотки.

Полюсы крепят к станине болтами. В двигателях с высотами оси вращения до 315 мм нарезку отверстий для болтов выполняют непосредственно в сердечнике полюса, а в двигателях с высотами оси вращения более 315 мм — в стальных стержнях, вставляемых в выштампованные отверстия полюсов. Между сердечниками главных

полюсов и станиной размещают стальные прокладки, необходимые для регулирования зазоров между полюсами и якорем.

Расчет крепления главных полюсов проводят по [Л. 1].

Выполнение добавочных полюсов

Добавочные полюсы двигателей с высотами оси вращения до 132 мм могут выполняться цельными из полосовой стали Ст. 3, а у двигателей с высотами оси вращения 160—500 мм — собранными из отдельных штампованных листов электротехнической стали толщиной 1 мм. При цельных сердечниках полюсов наконечники также изготовляют из полосовой стали и крепят к сердечникам винтами; при этом сердечнику обычно придают длину меньшую, чем наконечнику образуя таким образом уступы для крепления катушек. Листы шихтованных полюсов штампуют вместе с наконечником, образуя уступы для крепления катушек по бокам полюсов. Шихтованные добавочные полюсы двигателей с высотами оси вращения 355—500 мм имеют Т-образную форму для уменьшения магнитной индукции в наиболее насыщенной части полюсов и повышения механической прочности их крепления.

Для регулирования зазоров между добавочными полюсами и станиной размещают металлические прокладки; у двигателей с высотами оси вращения до 315 мм прокладки стальные магнитные, а при высотах оси вращения 355—500 мм — частично немагнитные.

Расчет крепления добавочных полюсов проводят по [Л. 1].

е) Подшипниковые щиты и подшипники. Расчет подшипников качения

Подшипниковые щиты обычно выполняют литыми чугунными; в двигателях с высотами оси вращения до 132 мм для уменьшения массы и снижения трудоемкости механической обработки щиты выполняют литыми под давлением из алюминиевого сплава.

В переднем подшипниковом щите (со стороны коллектора) предусматривают прямоугольные отверстия — окна для обслуживания коллектора и токосъемного устройства. Эти отверстия закрывают либо жалюзи, которые должны соответствовать требованиям защиты IP22, либо глухими крышками при исполнении двигателя по степени защиты IP44. В заднем щите при исполнении двигателя по степени защиты IP22 предусматривают прямоугольные отверстия — окна для прохождения охлаждающего воздуха, закрываемые жалюзи.

Аксиальные размеры щитов целесообразно по возможности сокращать (за счет удлинения станины), так как при этом уменьшается деформация щитов при их механической обработке и сборке двигателя. При этом следует иметь в виду, что при чрезмерном сокращении длины щитов (выполнение щитов в форме, близкой к диску) отверстия для обслуживания коллектора и токосъемного устройства, а также при исполнении IP22 — для прохождения охлаждающего воздуха предусматриваются в станине.

Принципиальная конструкция подшипниковых узлов двигателей постоянного тока аналогична описанной в § 9-3,*г* для асинхронных двигателей.

У двигателей с h=80÷200 мм обычно применяют как со стороны привода, так и с противоположной стороны шариковые подшипники; у двигателей с h=225÷315 мм — со стороны привода — роликовые и с противоположной стороны — шариковые подшипники. Все подшипни-

ки радиальные однорядные средней серии. У двигателей с $h=355\div500$ мм, опоры которых воспринимают значительные радиальные или аксиальные нагрузки, могут применяться со стороны привода радиальные двухрядные подшипники (приложение 14).

Шариковые подшипники двигателей с $h=80\div200$ мм могут воспринимать осевые нагрузки, не превышающие силы тяжести якоря с насаженной на вал муфтой; эти двигатели можно применять для работы как в горизонтальном, так и в вертикальном положении, но без дополнительных осевых нагрузок от приводимых механизмов.

Методика расчета подшипников качения аналогична изложенной в § 9-3,г для асинхронных двигателей, но необходимо учитывать следующее изменение: в уравнениях (9-23) и (9-24) следует принимать коэффициент $k_п$ равным 2 для двигателей с $h\leqslant315$ мм и 2,5 для двигателей с $h>315$ мм; при отсутствии аксиальной нагрузки от приводимого механизма и при вертикальном расположении вала двигателя постоянного тока аксиальная нагрузка, Н,

$$A=P'_2+P_{шк}+P_к+0,1R.$$

ж) Обмотки якорей; расчет бандажей и клиньев

Обмотки якорей можно подразделить на основные группы, приведенные в § 17-3.

Обмотки якорей двигателей с $h=80\div200$ мм выполняют в виде мягких катушек из круглого медного эмалированного провода. Полузакрытые овальные пазы имеют шлицы достаточной ширины для обеспечения наибольшей технологичности при укладке обмотки. Для повышения надежности корпусную изоляцию на выходе из паза (по торцам сердечника) заворачивают, образуя так называемые манжеты (см. рис. к табл. 9-11). Между верхними и нижними слоями в лобовых частях обмотки помещают изоляционные прокладки из того же материала, что и корпусная изоляция.

Конструкция изоляции всыпной обмотки приведена в табл. 9-11.

Обмотки якорей двигателей с $h=225\div315$ мм выполняют в виде формованных жестких катушек из прямоугольного медного эмалированного провода. Между верхними и нижними слоями лобовых частей помещают прокладки из лакостеклослюдопласта или гибкого миканита. Конструкция изоляции указанных обмоток приведена в табл. 9-12.

Обмотки якорей двигателей с $h=355\div500$ мм выполняют в виде формованных жестких катушек из прямоугольного медного провода марки ПСД (при классах нагревостойкости изоляции B и F) или ПСДК (при классе H). Для повышения надежности обмотки промежуточные секции дополнительно изолируют стеклянной лентой (классы B и F) или полиимидной пленкой (класс H). Конструкция изоляции обмотки якоря при классе нагревостойкости изоляции B приведена в табл. 9-13, а при классах F и H — в табл. 9-14.

Для закрепления обмотки в пазах якоря применяют бандажи и клинья. Крепление обмоток якорей с полузакрытыми пазами осуществляют клиньями из стеклотекстолита прямоугольной или полукруглой формы, а якорей с открытыми пазами при высотах оси вращения до 315 мм бандажами из стальной луженой проволоки или из нетканой стеклоленты, располагаемыми в кольцевых бандажных канавках сердечника якоря, либо клиньями. Чтобы бандажи не выступали за пределы наружной поверхности якоря, листы, находящиеся под банда-

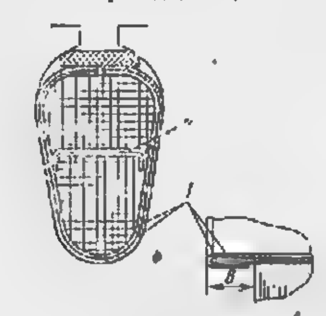
жом, штампуют с меньшим диаметром. По длине сердечника располагают несколько бандажных канавок. Длина каждой канавки $l_б$ не должна превышать 15—20 мм, а общая длина всех канавок $n_б l_б$ должна быть не более 35% конструктивной длины сердечника якоря.

Под проволочными бандажами должна располагаться дополнительная изоляция. Проволочные бандажи скрепляют скобами из луженой жести и пропаивают оловянным припоем или оловом.

Таблица 9-11

Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока

(пазы овальные полузакрытые; обмотка двухслойная всыпная из круглого эмалированного провода; напряжение до 600 В)



Высота оси вращения *h*, мм	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка — Класс B	Класс F	Класс H	Толщина, мм	Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
80—112		Пленкостеклопласт					
	1	Изофлекс	Имидофлекс		0,35	1	0,35
	2	То же	То же		0,35	1	0,35
132—200		Пленкостеклопласт					
	1	Изофлекс	Имидофлекс		0,25	2	0,5
	2	То же	То же		0,25	2	0,5

Примечание. Прокладки между катушками в лобовых частях обмотки выполняют из материала, указанного в поз. 1.

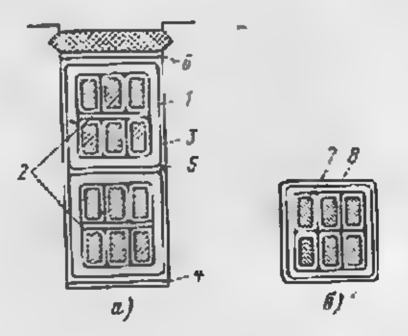
Бандажи из стеклоленты находят все большее применение, так как обладают существенными преимуществами по сравнению с проволочными бандажами: отпадает необходимость в изоляции между бандажом и обмоткой, отсутствуют потери в бандаже от вихревых токов, уменьшается трудоемкость изготовления бандажа, однако стеклобандажи занимают больше места, чем проволочные, так как допускают меньшие напряжения на разрыв.

Стеклобандаж выполняется из нетканой стеклоленты, состоящей из параллельно уложенных стеклонитей, пропитанных полимерным связующим. Среднее содержание связующего в ленте составляет 20—25%. В процессе изготовления, полимеризации и последующего остывания бандажа заданное усилие натяжения ленты несколько снижается, что необходимо учитывать при расчете стеклобандажа. Натяжение ленты

Таблица 9-12

Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока

(пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная с жесткими формованными катушками из прямоугольного эмалированного провода; $h = 225 \div 315$ мм; напряжение до 600 В)



а) б)

Часть обмотки	[redacted]ция на рисунке	Материал: Наименование, марка — Класс В	Класс F	Класс H	Толщина, мм — Класс В	Классы F, H	Число слоев — Класс В	Классы F и H	Двусторонняя толщина изоляции, мм — по ширине	по высоте при $w_{сз}$ — 1*	2	3	4
Пазовая, рис. а	1	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий-F	Синтофолий-H	0,15	0,16	4,5 оборота**	3,5 оборота**	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	То же	То же	То же	0,15	0,16	0—6		—	—	0,3	0,6	0,9
	3	Стеклолакоткань ЛСП			0,15		1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
	4	Стеклотекстолит СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5

Продолжение табл. 9.12

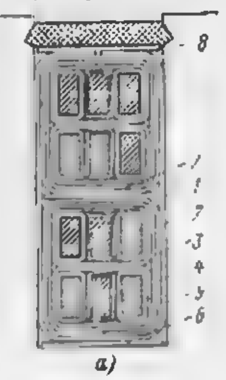
Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал					Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка			Толщина, мм				по ширине	по высоте при $w_{сл}$			
		Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Классы F, H	Класс B	Классы F и H		1*	2	3	4
Пазовая, рис. *а*	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	6	То же	То же	То же	0,5		1	1	—	0,5	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки							0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина или без высоты бандажной канавки)							1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая, рис. *б*	7	Лента стеклослюдинитовая ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная марки ПМ 0,05 мм × 3 = = 0,15 мм	0,15		1 вполнахлеста**		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Лента стеклянная ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	—	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)							1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

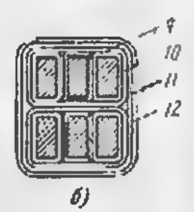
* Виток состоит из двух параллельных проводников, расположенных по высоте.
** С учетом усадки на 15—20%

Таблица 9-13

Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока

(пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушечья разрезная с жесткими формованными катушками из провода марки ПСД, $h = 355 \div 500$ мм; напряжение до 1000 В. Класс нагревостойкости изоляции В)


а)



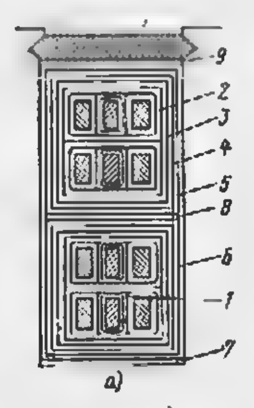
б)

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине при $N_ш$ 2	3	4	5	по высоте
Пазовая, рис. *а*	1	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 впритык	0,28	0,28	0,28	0,28	1,12
	3	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	1,12
	4	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
	5	Стеклолакоткань ЛСП-130/155	0,15	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	—	Разбухание от пропитки	—	—	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5
	6	Стеклотекстолит СТ	0,5	1	—	—	—	—	0,5
	7	То же	0,5	1	—	—	—	—	0,5
	8	То же	0,5	1	—	—	—	—	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки			0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина)			2,14	2,14	2,44	2,54	6,24
Лобовая, рис. *б*	9	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	10	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 впритык	0,28	0,28	0,28	0,28	0,56
	11	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	12	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	—	Разбухание от пропитки			0,3	0,3	0,4	0,5	0,3
	—	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)			1,54	1,54	1,54	1,74	2,02

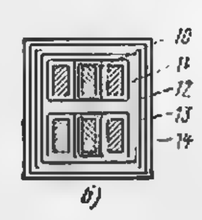
Таблица 9-14

Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока

(пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушечья разрезная с жесткими формованными катушками из провода марки ПСД (класс F) и ПСДК (класс H); $h = 355 \div 500$ мм; напряжение до 1000 В)



а)



б)

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка — Класс F	Материал: Наименование, марка — Класс H	Толщина, мм — Класс F	Толщина, мм — Класс H	Число слоев — Класс F	Число слоев — Класс H	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине при $N_ш$ = 2	3	4	5	по высоте
Пазовая, рис. а	1	Лента стеклянная ЛЭС	Пленка полиимидная ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Пленка полиимидная ПМ		0,05		3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Лента стеклянная ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Фенилоновая бумага		0,2		1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	7	Стеклотекстолит СТЭФ	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	8	То же	То же	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	9	То же	То же	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки						0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина)						2,1	2,1	2,3	2,3	5,8
Лобовая, рис. б	10	Лента стеклянная ЛЭС	Пленка полиимидная ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	11	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	12	Пленка полиимидная ПМ		0,05		2 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	13	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	14	Лента стеклянная ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)						1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

при бандажировании осуществляют ступенчато, чтобы не было ослабления нижних слоев бандажа. Якоря с наложенными бандажами подвергают нагреву, который может быть совмещен с процессом сушки после пропитки обмотки.

В двигателях с высотами оси вращения свыше 315 мм обмотку в пазах обычно закрепляют клиньями из стеклотекстолита, рекомендации по размерам которых даны в § 17-3,*г*. Лобовые части обмоток якорей закрепляют бандажами из стальной луженой проволоки или нетканой стеклоленты.

Проволочные бандажи в пазовой и лобовой частях обмотки якоря при частоте перемагничивания более 50 Гц, а также в напряженных по коммутации двигателях выполняют из немагнитной проволоки. При этом уменьшаются поля рассеяния обмотки, а следовательно, и реактивная э. д. с. $e_р$. Уменьшаются также потери в бандажах на вихревые токи, вызванные полями рассеяния главных полюсов и обмотки якоря.

После припайки концов секций к коллекторным пластинам или к петушкам и наложения бандажей якоря подвергают пропитке. Обмотанные якоря с изоляцией класса B пропитывают лаками без растворителей (капельным или струйным методом), надежно цементирующими обмотку и повышающими ее теплопроводность. Обмотанные якоря с изоляцией классов F и H подвергают пропитке в лаках с растворителями, предпочтительно сначала в вакууме, а затем — под давлением.

В настоящее время в двигателях постоянного тока все большее распространение находит изоляция, сокращенно именуемая «монолит» и представляющая собою сочетание в основном стеклоткани и слюдинита с термореактивным эпоксидным или кремнийорганическим компаундом. Компаундирование обмотки производится в вакууме с последующим увеличением давления.

Включение в «монолит» слюдинитовых материалов преследует цель повышения влагостойкости.

Изоляция «монолит» обладает рядом существенных преимуществ: высокой нагревостойкостью и теплопроводностью, относительной простотой технологического процесса изолировки, повышенной эксплуатационной надежностью благодаря стойкости к тепловым ударам, температурным перегрузкам и повышенной механической прочности.

По данным испытания ряда двигателей постоянного тока со степенью защиты IP22 при применении изоляции «монолит» в обмотке якоря со стеклобандажами на лобовых частях и без крепления пазовой части превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри двигателя снижается (при продолжительном режиме работы) в среднем на 20%. В двигателях со степенью защиты IP44 применение изоляции «монолит» незначительно снижает превышение температуры обмотки якоря. Применение изоляции «монолит» с сохранением допустимых превышений температуры обмоток дает возможность поднять номинальную мощность двигателей в исполнении IP22 в среднем на 10%. Кроме того, возможно некоторое уменьшение толщины изоляционного слоя с сохранением электрической прочности. В результате того, что при компаундировании создается надежное сцепление катушек обмотки с сердечником якоря, в тихоходных двигателях могут быть исключены не только клинья, но и бандажи.

Указанная в табл. 9-11 и 9-12 конструкция изоляции обмотки якоря может быть применена для исполнения якорей с изоляцией «монолит» при условии замены материалов, в основе которых содержатся синтетические пленки, на стеклослюдинитовые или слюдопластовые мате-

риалы такой же толщины; при этом обмотки предпочтительнее выполнять из проводов со стекловолокнистой изоляцией.

Расчет проволочных бандажей

Число витков проволочного бандажа в одной канавке

$$w_б = (l_б - 0{,}2)/d - 1, \qquad (9\text{-}30)$$

где d — диаметр проволоки, мм.

Предварительное значение d в зависимости от высоты оси вращения двигателей:

h, мм	225	250—280	315
d, мм	1,0	1,5	2,0

Общее число витков бандажей

$$\Sigma W_б = 11{,}3 \frac{P'_{м2}(D_{н2} - h_{п2})}{\sigma_{доп} d^2} \left(\frac{n_р}{1000}\right)^2 \cdot 10^1. \qquad (9\text{-}31)$$

где $\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, принимаемое для бандажной проволоки равным $400 \cdot 10^6$ Па; $n_р$ — разгонная частота вращения, равная 1,2 наибольшей частоты вращения двигателя, об/мин; $P'_{м2}$ — сила тяжести обмотки якоря, $P'_{м2} = 9{,}81\, G_{м2}$; здесь $G_{м2}$ — масса обмотки якоря, кг.

При вычислении $w_б$ для пазовой части обмотки якоря в (9-31) подставляют силу тяжести, равную $P'_{м2} 2l_2/l_{ср2}$, а для каждой из лобовых частей силу тяжести одной из них, равную $(P'_{м2}/2)(1 - 2l_2/l_{ср2})$.

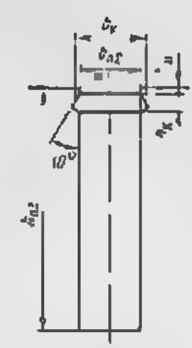


Рис. 9-34. К расчету пазового клина.

Расчет стеклобандажей

Общее число витков бандажей

$$\Sigma w_б = 9 \frac{P'_{м2}(D_{н2} - h_{п2})}{\sigma_{доп} q_л} \left(\frac{n_р}{1000}\right)^2 \cdot 10^4, \qquad (9\text{-}32)$$

где $\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, равное $150 \cdot 10^6$ Па для стеклоленты класса нагревостойкости В, и $130 \cdot 10^6$ Па — класса F; $q_л$ — площадь поперечного сечения ленты, мм².

Вычисление $w_б$ отдельно для пазовой и лобовой части якоря проводят с подстановкой в (9-32) соответствующих сил тяжести $P'_{м2}$, как указано выше для проволочных бандажей.

Расчет клиньев

Напряжение изгиба в клине, Па,

$$\sigma = \frac{84 b_к \dfrac{P'_{м2}}{l_{ср2}} (D_{н2} - h_{п2}) \left(\dfrac{n_р}{1000}\right)^2}{h^2_к} 10^4, \qquad (9\text{-}33)$$

где $b_к$, $h_к$, $h_{п2}$ указаны на рис. 9-34. Значение σ не должно превышать $25 \cdot 10^6$ Па.

Напряжение среза в клине, Па,

$$\tau = \frac{32 \frac{P'_{м2}}{l_{ср2}} (D_{н2} - h_{п2}) \left(\frac{n_р}{1000}\right)^2}{h_к} 10^4. \quad (9\text{-}34)$$

Значение τ для клиньев из стеклотекстолита не должно превышать $15 \cdot 10^6$ Па.

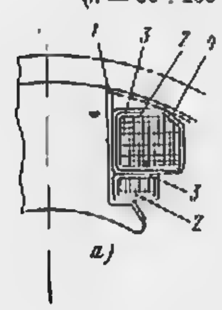
з) Обмотки возбуждения главных и добавочных полюсов

Сердечники главных и добавочных полюсов двигателей с высотами оси вращения от 80 до 200 мм изолируют методом напыления (вихревым способом) полимерными пленками. Полюс нагревают до температуры, близкой к температуре плавления эпоксидной смолы, и помещают в камеру с порошкообразной эпоксидной смолой, находящейся во взвешенном состоянии. Последнее может достигаться тем, что из нижней части камеры поступают под давлением струи воздуха. Эпоксидная смола осаждается на поверхностях полюса, за исключением тех, которые защищены от осаждения. Полюс выдерживают в камере около

Таблица 9-15

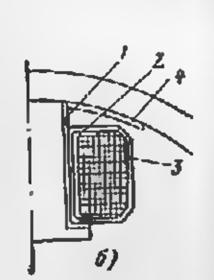
Изоляция и крепление обмоток главных и добавочных полюсов двигателей постоянного тока

($h = 80 \div 200$ мм; напряжение до 600 В)





Главный полюс



Добавочный полюс

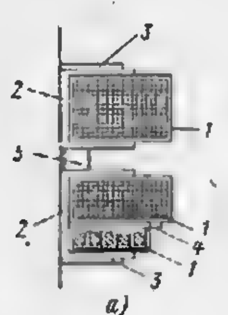
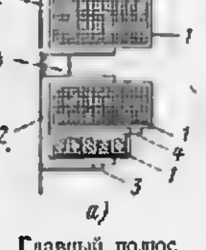
Позиция на рисунке	Назначение	Материал: Класс B	Материал: Класс F	Материал: Класс H	Толщина, мм	Число слоев
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола			1,0	—
2	Изоляция катушки	Лакотканеслюдопласт			0,25	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Изоляция катушки	Лента стеклянная ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
4	Рамка	Стеклотекстолит			0,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		

5—10 с, в зависимости от необходимой толщины покрытия. После отверждения покрытие имеет высокие электрические и механические свойства. При толщине пленки 0,5 мм и температуре 155°C пробивное напряжение составляет 10 кВ/мм. При изолировании способом напыления радиус закругления кромок полюсов должен быть не менее 1 мм.

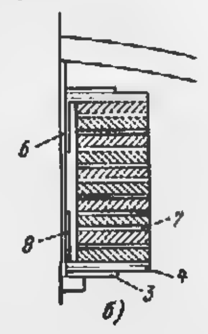
Таблица 9-16

Изоляция и крепление обмоток главных и добавочных полюсов двигателей постоянного тока

($h = 225 \div 315$ мм; напряжение до 600 В. Классы нагревостойкости изоляции B, F, H)

Главный полюс

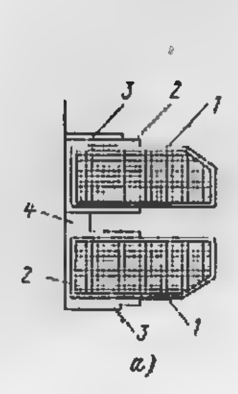


Добавочный полюс

Позиция на рисунке	Назначение	Материал: Наименование, марка — Класс B	Класс F	Класс H	Толщина, мм — Класс B	Классы F, H	Число слоев
1	Изоляция катушки	Лента стеклянная ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань: ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	2,0		1
3	Рамка	Сталь Ст3			1,5		1
4	Рамка	Стеклотекстолит: СТ	СТЭФ	СТК	1,5		1
5	Скоба	Сталь Ст3			8—10		1
6	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий-F	Синтофолий-Н	0,15	0,16	7,5
7	Прокладка междувитковая	Бумага асбестовая	Бумага фенилоновая 0,2 мм×2=0,4 мм		0,3	0,2×2	1
8	Изоляция углов	Лента стеклянная ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста

Изоляция и крепление обмоток главных и добавочных полюсов двигателей постоянного тока

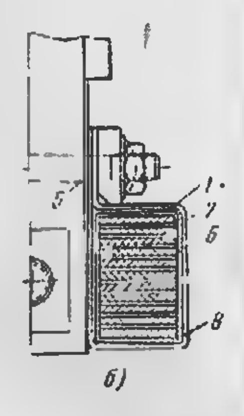
(h = 355 ÷ 500 мм; напряжение до 1000 В)



а)



Главный полюс



б)

Добавочный полюс

Позиция на рисунке	Назначение	Материал						Число слоев
		Наименование, марка			Толщина, мм			
		Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Класс F	Класс H	
1	Изоляция катушки	Лента стеклянная ЛЭС			0,1			1 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань: ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	3,5			1
3	Рамка	Сталь Ст3			2—3			1
4	Скоба	Сталь Ст3			8—12			1
5	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий-F	Синтофолий-H	0,15	0,16	0,16	7,5
6	Прокладка междувитковая	Бумага асбестовая		Бумага фенилоновая 0,2 мм×2=0,4 мм	0,3	0,3	0,4	1
7	Изоляция катушки	Лента стеклослюдинитовая ЛС-ПЭ 934-ТП		Пленка полиимидная ПМ 0,05 мм×3	0,15			7
8	Хомут	Латунь Л62			2,0			1

Катушки возбуждения после пропитки и сушки насаживаются на полюс и закрепляются стальными пружинящими рамками. Параллельную или независимую обмотку выполняют в виде цельных катушек, а стабилизирующую последовательную обмотку (при ее наличии) — в виде отдельной катушки, обычно располагаемой на полюсе ближе к якорю.

Конструкция изоляции обмоток главных и добавочных полюсов двигателей с h=80÷200 мм приведена в табл. 9·15.

Для изоляции от сердечника на катушки обмотки главных полюсов двигателей с высотами оси вращения 225÷315 мм плотно насаживают изоляционный каркас При необходимости катушки дополнительно изолируют стеклянной лентой.

Параллельную или независимую обмотку выполняют из двух отдельных катушек-шайб для увеличения поверхности охлаждения. При смешанном или параллельном возбуждении со стабилизирующей последовательной обмоткой катушки последовательной и параллельной обмоток располагают друг над другом в одних и тех же каркасах.

Обмотка добавочных полюсов, выполняемая из изолированных проводов, не подразделяется на шайбы и имеет конструкцию изоляции, аналогичную указанной для обмотки главных полюсов. При выполнении обмотки из голой меди, гнутой на ребро, сердечник полюса изолируют слюдопластофолием (класс B) или синтофолием (классы F и H).

Крепление пропитанных обмоток главных и добавочных полюсов может осуществляться стальными пружинящими рамками.

Конструкция изоляции обмоток главных и добавочных полюсов двигателей с h=225÷315 мм приведена в табл. 9·16, а обмоток главных и добавочных полюсов двигателей с h=355÷500 мм в табл. 9·17 Катушки добавочных полюсов двигателей с h=355÷500 мм крепятся посредством хомутов.

Способы пропитки обмоток полюсов всех двигателей такие же, как указанные в § 9·4.ж для обмоток якорей.

Выполнение обмоток полюсов с изоляцией «монолит» значительно снижает их нагрев по данным испытания ряда двигателей со степенью защиты IP22 снижение превышения температуры обмоток главных и добавочных полюсов над температурой воздуха внутри двигателя составило в среднем 30% При выполнении обмоток полюсов двигателей с h=80÷200 мм с изоляцией «монолит» катушки, изолированные от сердечника полюса стеклянной лентой вполнахлеста, насаживают на полюс и пропитывают совместно с полюсом термореактивным компаундом. При таком способе пропитки значительно повышается теплоотдача катушек и создается надежное сцепление катушек с сердечниками полюсов, что позволяет исключить металлические и изоляционные рамки, а также другие элементы крепления катушек. У двигателей с h>200 мм пропитке в термореактивном компаунде подвергают катушки с насаженными на них изоляционными каркасами.

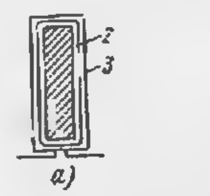
и) Компенсационная обмотка

Стержневую компенсационную обмотку располагают в прямоугольных полузакрытых пазах наконечника главного полюса. Лобовые части обмотки имеют форму дуг и соединяются со стержнями либо пайкой, либо болтами (в случае разъемных станин) Дуги компенсационной обмотки не изолируют; расстояние между ними, равное 5—6 мм, выдерживают с помощью дистанционных стеклотекстолитовых прокладок.

Таблица 9-18

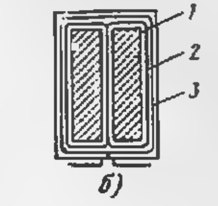
Изоляция компенсационной обмотки двигателей постоянного тока

(пазы прямоугольные полузакрытые; обмотка однослойная стержневая; h — 355÷500 мм; напряжение до 1000 В)



а)

Исполнение с одним стержнем в пазу



б)

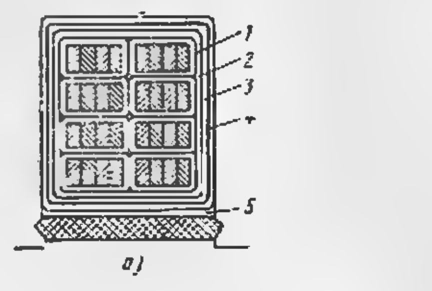
Исполнение с двумя стержнями в пазу

Позиция на рисунке	Материал						Число слоев			Двусторонняя толщина изоляции, мм			
	Наименование, марка			Толщина, мм						рисунок а)		рисунок б)	
	Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Класс F	Класс H	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Лента стеклослюдинитовая ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная ПМ	0,1	0,1	0,05	1 вполнахлеста		2 вполнахлеста	—	—	0,8	0,8
2	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий-F	Синтофолий-Н	0,15	0,16	0,16	1,5 оборота	3,5 оборота	3,5 оборота	1,1	1,1	1,1	1,1
3	Лакотканеслюдопласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	Фенилоновая бумага		0,15	0,15	0,15	1	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3
—	Допуск на укладку обмотки									0,2	0,4	0,3	0,4
—	Общая толщина изоляции в пазу									1,6	1,8	2,5	2,6

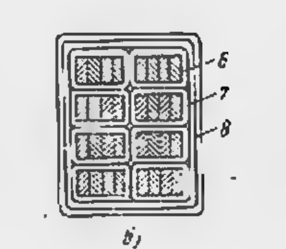
Таблица 9-19

Изоляция компенсационной обмотки двигателей постоянного тока

(пазы прямоугольные открытые; обмотка однослойная секционная из голых проводов; $h = 355 \div 500$ мм; напряжение до 1000 В; класс нагревостойкости изоляции B)



а)



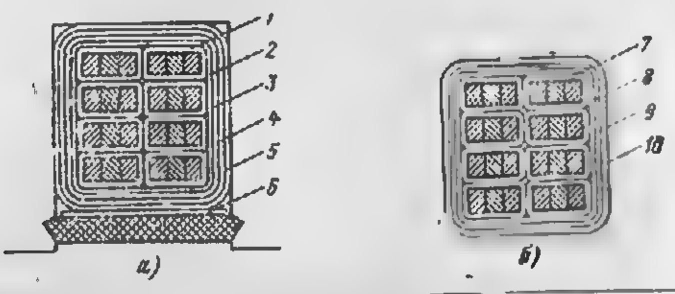
б)

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине при $N_ш$ = 1	по ширине при $N_ш$ = 2	по высоте при $N_в$ = 2	по высоте при $N_в$ = 3	по высоте при $N_в$ = 4
Пазовая, рис. *а*	1	Лента стеклослюдопластовая ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	1,12	1,68	2,24
	2	То же	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	3	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 встык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	4	Стеклолакоткань ЛСП-130/155	0,15	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	5	Стеклотекстолит СТ	0,5	1	—	—	0,5	0,5	0,5
	—	Разбухание от пропитки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки			0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без высоты клина)			2,22	2,78	3,68	4,24	4,8
Лобовая, рис. *б*	6	Лента стеклослюдопластовая ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	1,12	1,68	2,24
	7	То же	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	8	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 встык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	—	Общая толщина изоляции секции в лобовой части			1,32	1,88	1,88	2,44	3,00

Таблица 9-20

Изоляция компенсационной обмотки двигателей постоянного тока

(пазы прямоугольные открытые; обмотка однослойная секционная из голых проводов; $h = 355 \div 500$ мм, напряжение до 1000 В)



Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал. Наименование, марка: класс F	класс H	Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине при $N_ш$ 1	по ширине при $N_ш$ 2	по высоте при $N_в$ 2	по высоте при $N_в$ 3	по высоте при $N_в$ 4
Пазовая, рис. *а*	1	Фенилоновая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	2	Пленка полиимидная ПМ		0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	3	Фенилоновая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	4	Лента стеклянная ЛЭС		0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	5	Фенилоновая бумага		0,2	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	6	Стеклотекстолит СТЭФ	Стеклотекстолит СТК	0,5	1	—	—	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки				0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без высоты клина)				2,5	2,9	3,6	4,0	4,4
Лобовая, рис. *б*	7	Фенилоновая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	8	Пленка полиимидная ПМ		0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	9	Фенилоновая бумага		0,05	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	10	Лента стеклянная ЛЭС		0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	—	Общая толщина изоляции секции в лобовой части				1,8	2,2	2,2	2,6	3,0

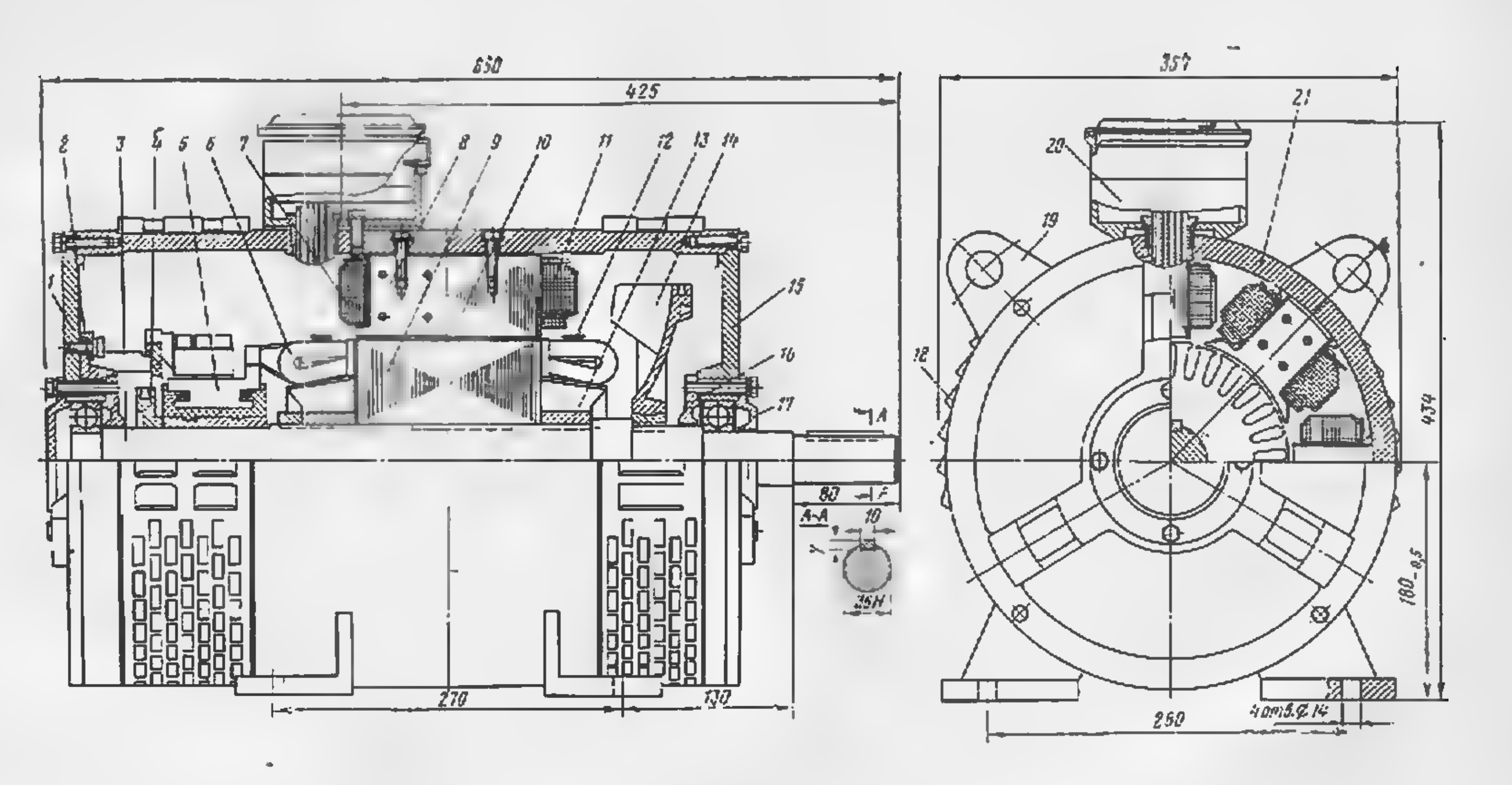


Рис. 9-35. Общий вид двигателя постоянного тока с $h=180$ мм; степень защиты IP22; способ охлаждения IC01; 15 кВт, 220 В, 1500 об/мин.

1 — щит подшипниковый, 2 — траверса; 3 — вал; 4 — кольцо для размещения балансировочных грузов; 5 — коллектор; 6 — обмотка якоря; 7 — обмотка добавочного полюса; 8 — сердечник добавочного полюса; 9 — сердечник якоря; 10 — сердечник главного полюса; 11 — обмотка возбуждения главного полюса; 12 — бандаж лобовых частей обмотки якоря; 13 — обмоткодержатель; 14 — вентилятор; 15 — щит подшипниковый; 16 — крышка подшипниковая внутренняя; 17 — крышка подшипниковая наружная; 18 — жалюзи; 19 — транспортное ушко; 20 — вводное устройство; 21 — станина

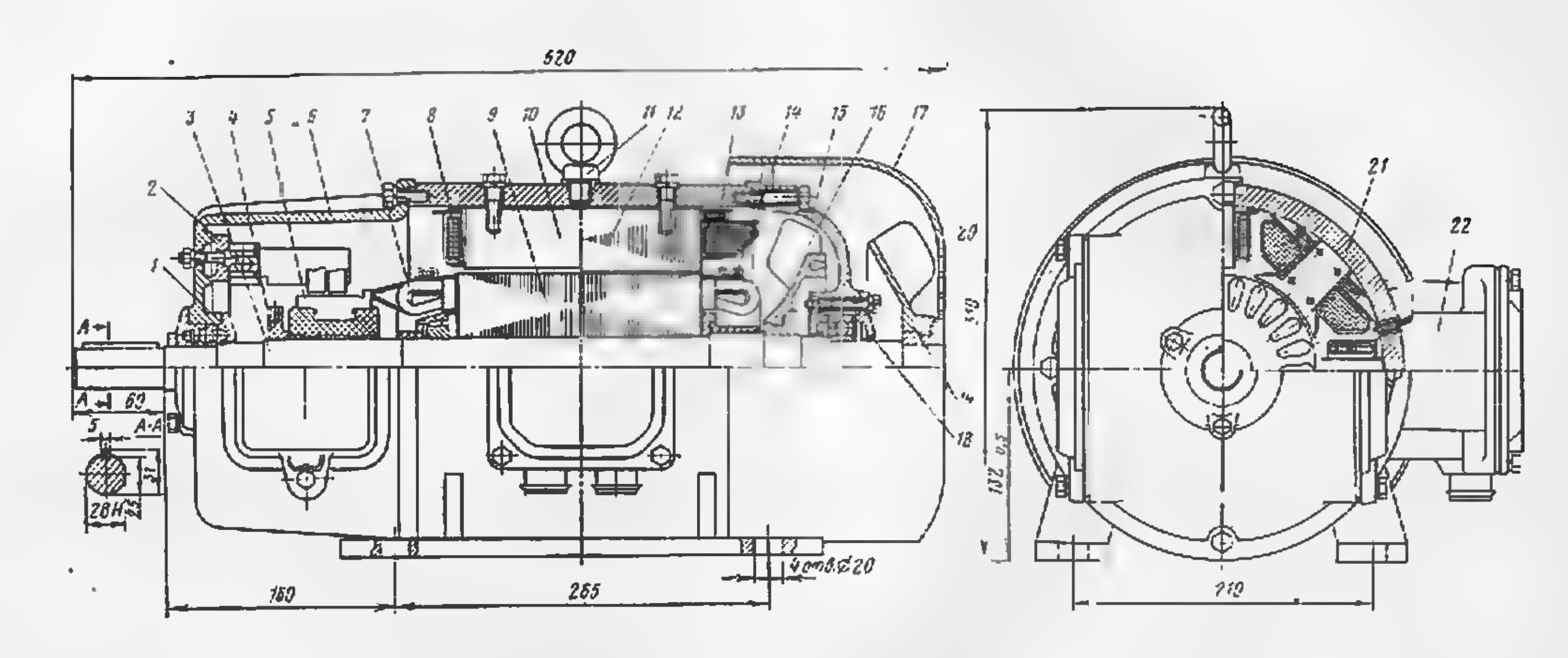


Рис. 9-36. Общий вид двигателя постоянного тока с $h=132$ мм; степень защиты IP44, способ охлаждения IC0141; 5,5 кВт, 220 В, 1500 об/мин.

1 — крышка подшипниковая внутренняя; 2 — траверса; 3 — вал; 4 — кольцо для размещения балансировочных грузов; 5 — коллектор; 6 — щит подшипниковый; 7 — обмотка якоря; 8 — обмотка добавочного полюса; 9 — сердечник якоря; 10 — сердечник добавочного полюса; 11 — рым-болт; 12 — сердечник главного полюса; 13 — обмотка возбуждения главного полюса; 14 — бандаж лобовых частей обмотки якоря; 15 — подшипниковый щит; 16 — внутренний вентилятор-мешалка; 17 — кожух наружного вентилятора; 18 — крышка подшипниковая наружная; 19 — наружный вентилятор; 20 — крышка люковая; 21 — станина; 22 — вводное устройство

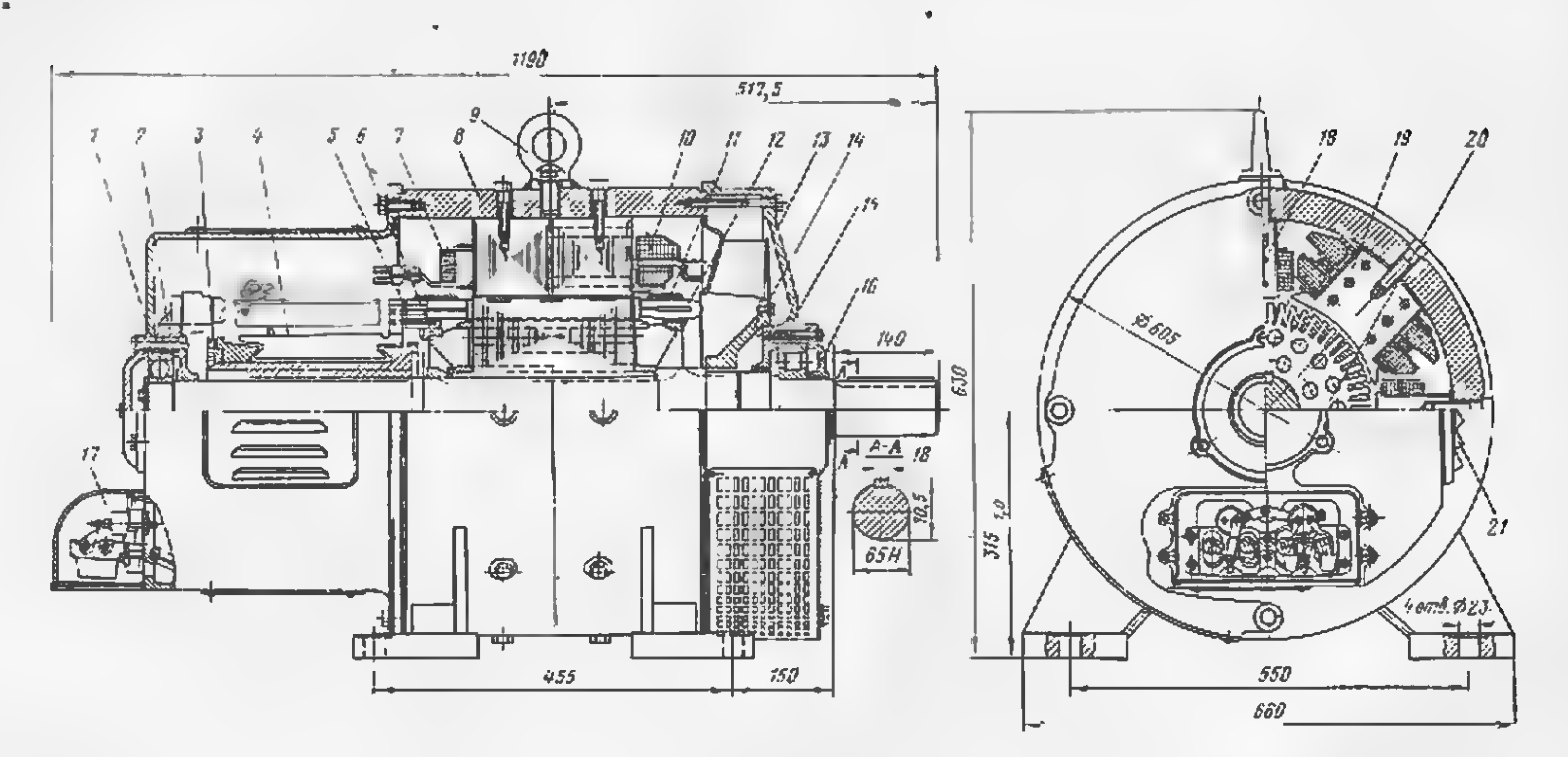
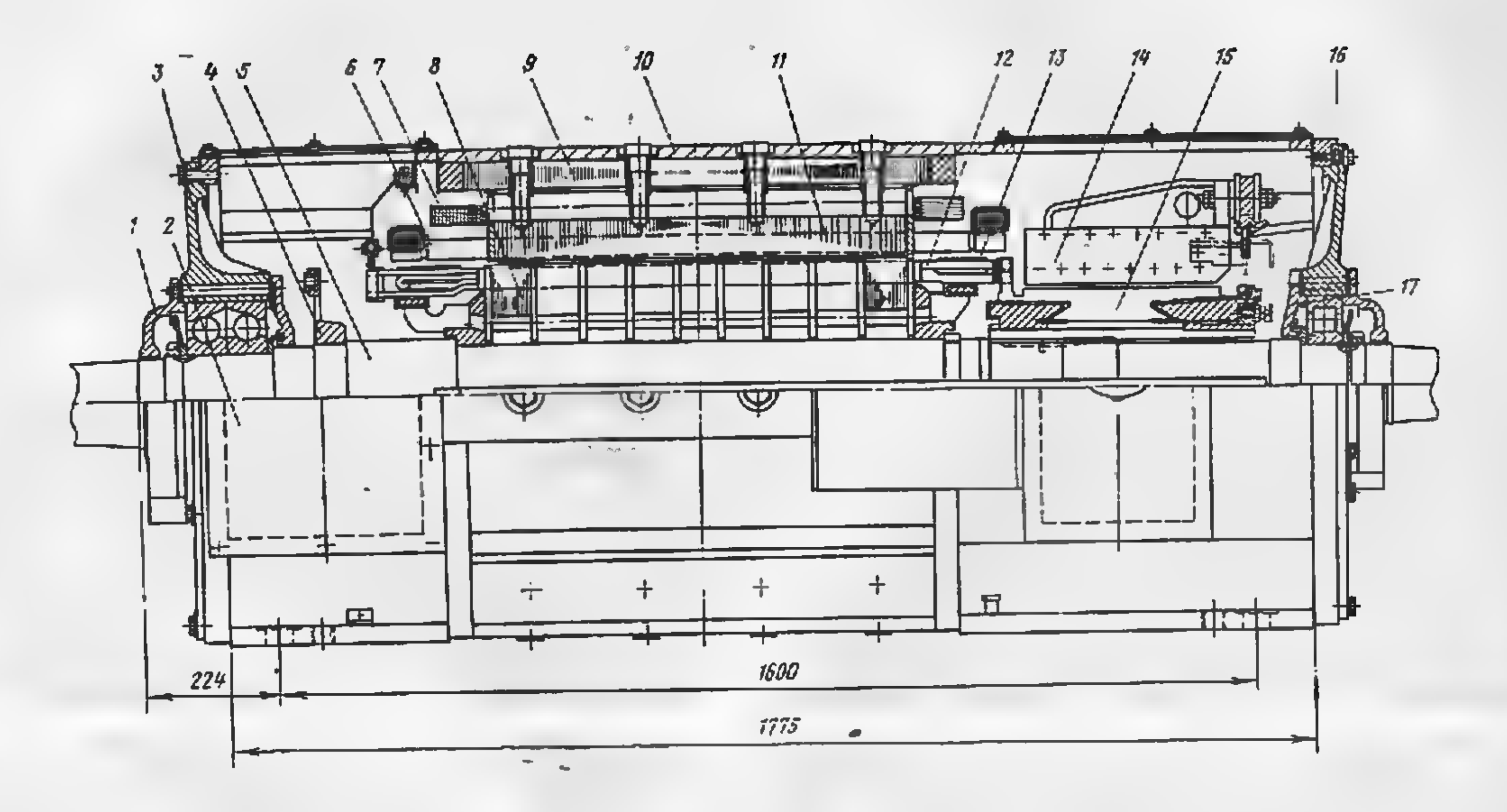


Рис. 9-37. Общий вид двигателя постоянного тока с $h = 315$ мм; степень защиты IP22; способ охлаждения IC01. 75 кВт, 220 В, 1500 об/мин

1 — подшипниковый щит; 2 — траверса; 3 — фланец коллектора с канавкой для размещения балансировочных грузов; 4 — коллектор; 5 — уравнительные соединения обмотки якоря; 6 — обмоткодержатель; 7 — обмотка добавочных полюсов; 8 — станина; 9 — рым-болт; 10 — обмотка главных полюсов; 11 — бандаж лобовой части обмотки якоря; 12 — обмотка якоря; 13 — щит подшипниковый; 14 — вентилятор; 15 — крышка подшипниковая внутренняя; 16 — крышка подшипниковая наружная; 17 — вводное устройство; 18 — сердечник добавочного полюса; 19 — сердечник главного полюса; 20 — сердечник якоря; 21 — жалюзи.


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
224
1600
1775

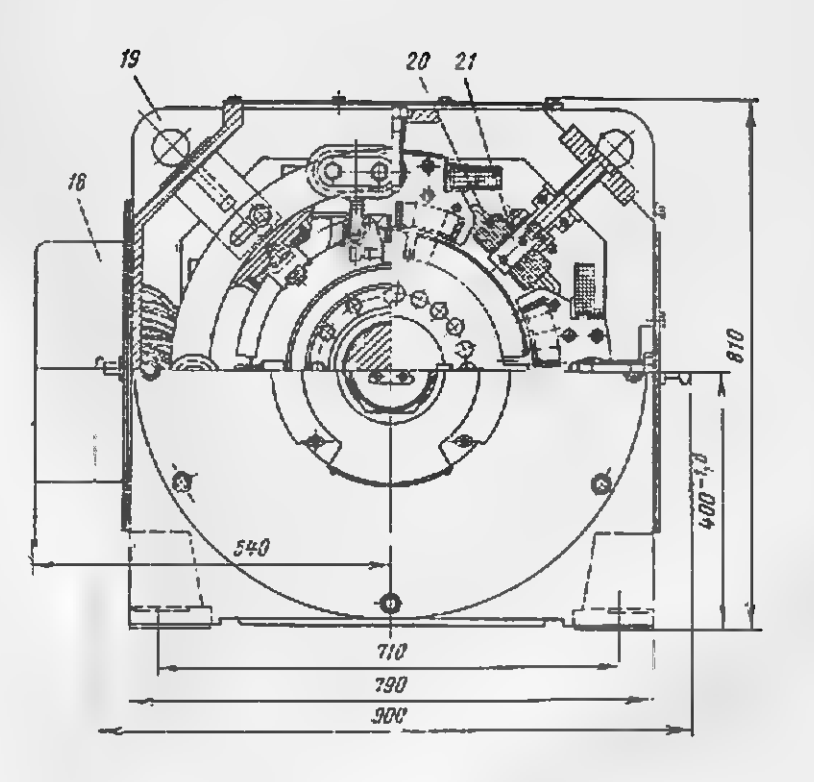


Рис. 9-38. Общий вид двигателя постоянного тока с $h=400$ мм; степень защиты IP44; способ охлаждения IC37; 500 кВт, 440 В, 750 об/мин.

1 — крышка подшипниковая наружная; 2 — люковая крышка; 3 — щит подшипниковый; 4 — кольцо для размещения балансировочных грузов; 5 — вал; 6 — компенсационная обмотка; 7 — обмотка возбуждения главных полюсов; 8 — сердечник якоря; 9 — шихтованная станина; 10 — корпус станины; 11 — сердечник главного полюса; 12 — обмотка якоря; 13 — бандаж лобовых частей обмотки якоря; 14 — бракет щеткодержателей; 15 — коллектор; 16 — щит подшипниковый; 17 — крышка подшипниковая внутренняя; 18 — вводное устройство; 19 — транспортное ушко; 20 — обмотка добавочного полюса; 21 — сердечник добавочного полюса.

Секционную компенсационную обмотку располагают в прямоугольных открытых пазах полюсного наконечника и крепят клиньями. Секционную обмотку, как и стержневую, выполняют из голых проводов. Конструкция изоляции стержней компенсационной обмотки приведена в табл. 9-18, а катушек секционной — в табл. 9-19 и 9-20.

к) Токосъемное устройство

Токосъемное устройство двигателей постоянного тока включает в себя щетки и щеткодержатели, бракеты, к которым прикреплены щеткодержатели, и у двигателей с $h=80 \div 315$ мм траверсы, несущие на себе бракеты; у двигателей с $h=355 \div 500$ мм бракеты крепятся непосредственно к подшипниковому щиту.

Щеткодержатели выполняются литыми латунными или штампованными из листовой латуни. Щетка прижимается к коллектору пружиной, причем конструкция щеткодержателя должна обеспечивать постоянство силы нажатия пружины по мере износа щеток. Для обеспечения плавного перемещения щеток в щеткодержателе между щеткой и стенками щеткодержателя должен быть выдержан зазор в пределах 0,1—0,3 мм

Бракеты имеют призматическую форму; выполняют их у малых двигателей из текстолита или стеклотекстолита, а у больших двигателей — из полосовой стали, опрессованной пластмассой в месте крепления к траверсе. Бракеты соединяют с траверсой изолированными болтами и планками.

Траверсы у малых двигателей — неразъемные, имеющие прорезь, которая при закреплении траверсы стягивается болтом; при отпущенном болте траверсу можно поворачивать для установки в необходимом положении при испытании двигателя. В больших двигателях траверсу изготовляют из двух половин, соединяемых винтами; такая траверса при отпущенных винтах может при испытании двигателя поворачиваться. Необходимое положение траверсы фиксируется стопорным винтом.

Токосъемное устройство соединяют с выводами двигателя кабелем, а при большой силе тока — шиной.

л) Вентиляторы

Двигатели со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01 имеют центробежный реверсивный вентилятор, насаженный на вал якоря со стороны, противоположной коллектору (рис. 9-35).

Вентиляторы выполняют литьем под давлением из алюминиевого сплава, например АЛ9В. Заливка производится с внутренней стальной втулкой, которая обеспечивает надежную повторную (при ремонте двигателя) насадку вентилятора на вал. В наружной торцевой части литого вентилятора предусматривают одну или две кольцевые трапецеидальные канавки для размещения балансировочных грузов. Метод определения основных размеров центробежного вентилятора приведен в § 17-15,а.

Двигатели со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 имеют наружный центробежный вентилятор с прямыми лопатками, число которых у двигателей с $h=80 \div 200$ мм находится в пределах 8—12. Вентилятор насажен на конец вала, противоположный приводу и закрыт штампованным или сварным кожухом из листовой стали толщиною 1—2 мм (в зависимости от высоты оси вращения двигателя).

Кожух имеет на торце входные отверстия, конфигурация которых не должна создавать существенных препятствий для входа воздуха, а размеры должны соответствовать требованиям степени защиты IP20. Кожух крепится к приливам заднего подшипникового щита (рис. 9-36). Для улучшения охлаждения внутри таких двигателей размещают на валу со стороны, противоположной коллектору, вентилятор-мешалку. Наружный и внутренний вентиляторы выполняют литьем под давлением из алюминиевого сплава со стальной втулкой. Внутренний вентилятор имеет на торце кольцевую канавку для размещения балансировочных грузов.

Двигатели со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0041 имеют только внутренний вентилятор-мешалку.

Примеры конструкции двигателей постоянного тока различных исполнений и высот оси вращения приведены на рис. 9-35—9-38.

Глава десятая

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Под надежностью понимается свойство электрических машин сохранять работоспособность и значения установленных технических показателей при оговоренных стандартами или другими техническими документами в условиях использования, технического обслуживания, а также хранения и транспортировки.

Основными показателями надежности электрических машин являются:

1) вероятность безотказной работы, которая статистически определяется отношением числа машин, безотказно проработавших до момента времени t, к числу машин, работоспособных в начальный момент времени $t=0$. Безотказность — это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки;

2) средний ресурс, выражаемый математическим ожиданием ресурса. Под ресурсом понимают наработку машины от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего и капитального ремонта до наступления предельного состояния. При наличии данных о ресурсе n электрических машин статистическая оценка их среднего ресурса

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i; \tag{10-1}$$

3) средний срок службы, выражаемый математическим ожиданием срока службы. Этот показатель определяется по (10-1), причем под x_i в данном случае понимается срок службы. Срок службы — это календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Для асинхронных двигателей общего назначения современных серий основного исполнения установлен средний срок службы не менее

15 лет при среднем ресурсе не более 40 000 ч. Средний ресурс обмотки статора не менее 20 000 ч, подшипников — не менее 12 000 ч. Вероятность безотказной работы не менее 0,9 при 10 000 ч наработки.

Для двигателей постоянного тока общего применения принимают средний срок службы не менее 12 лет при среднем ресурсе 30 000 ч. Средний ресурс без смены подшипников — 10 000 ч, без смены смазки — 3000 ч, без смены щеток — 2000 ч. Вероятность безотказной работы не менее 0,9 при 2000 ч наработки.

При проектировании электрических машин должны быть предусмотрены необходимые мероприятия, обеспечивающие высокую надежность. Основными направлениями при этом являются:

обоснованный выбор электрических машин по степеням защиты, соответствующим условиям эксплуатации;

расширение номенклатуры создаваемых специализированных исполнений для тех областей народного хозяйства, где пользование двигателями общего назначения приводит к уменьшению срока службы,

ограничение скорости нарастания температуры обмоток асинхронных двигателей при заторможенном роторе;

применение изоляционных материалов и обмоточных проводов повышенной нагревостойкости, электрической и механической прочности;

усовершенствование конструкции обмоток;

усовершенствование клеток короткозамкнутых роторов больших асинхронных двигателей, расширение области применения заливки алюминием;

уменьшение уровня вибраций;

повышение срока службы подшипников;

внедрение встроенной температурной защиты;

уменьшение износа щеток в машинах постоянного тока;

повышение технологичности конструкции.

Степень защиты электрических машин от внешних воздействий непосредственно сказывается на их надежности.

Первые советские серии асинхронных двигателей и машин постоянного тока выполнялись в открытом исполнении. При разработке последующих серий (И, И2, АД, МА-200, АМ, ПН) было предусмотрено в качестве основного исполнение, защищенное от вертикально падающих капель, а в качестве модификации — исполнение продуваемое, с возможностью пристройки труб для подвода и отвода охлаждающего воздуха (например, двигатели АМО в серии АМ). Наиболее надежное по степени защиты закрытое исполнение с внешним обдувом (IP44, IC0141) предусматривалось только для машин узкоспециальных исполнений, например для угольных шахт, нефтяных промыслов, отдельных цехов химических предприятий. Такое положение, безусловно, весьма неблагоприятно сказывалось на надежности машин общего назначения.

Асинхронные двигатели общего назначения со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 были впервые разработаны в Советском Союзе в конце 40-х годов в единой серии А—АО, во всем диапазоне мощностей — от 0,6 до 100 кВт. Несколько позднее были разработаны двигатели постоянного тока в единой серии П со степенью защиты IP44 и способами охлаждения IC0141 и IC0151.

В процессе эксплуатации асинхронных двигателей серии А—АО мощностью до 10 кВт было установлено, что в большом числе случаев, там, где по условиям окружающей среды или по способу монтажа заведомо должны были бы устанавливаться только двигатели с исполне-

нием IP44, продолжали применяться двигатели исполнения IP23. В результате этого происходили частые эксплуатационные отказы. По имеющимся статистическим данным, 85—95% суммы всех отказов приходится на долю обмотки статора, 5—8% — на подшипниковые узлы, остальное — на прочие механические повреждения.

У двигателей постоянного тока отказы примерно в 65% случаев происходят по причине повреждений обмотки якоря, 15% — обмотки возбуждения, 9% — коллектора, остальные 11% случаев выхода из строя относятся к повреждениям подшипников и к другим механическим повреждениям.

Повреждения обмоток связаны прежде всего с попаданием внутрь двигателя различных посторонних тел (металлической стружки, эмульсии, пыли, дождя, снега и т. д.).

В серии асинхронных двигателей А2—АО2 было предусмотрено на ее нижнем участке, в диапазоне мощностей от 0,6 до 10 кВт, только исполнение по степени защиты IP44. Некоторый перерасход материалов (на 10—15%) и несколько более высокая стоимость таких двигателей по сравнению с двигателями со степенью защиты IP23 вполне оправдываются значительным повышением их надежности: по приблизительной оценке примерно в 1,5 раза.

Значительное повышение надежности электрических машин обеспечивается разработкой и внедрением различных специальных исполнений, рассчитанных на специфические условия работы и физические (а также химические) свойства окружающей среды (см. гл. 6).

Значительное влияние на надежность асинхронных двигателей оказывает скорость нарастания температуры обмоток при заторможенном роторе. Начальная скорость нарастания температуры обмотки, °С/с, определяется для медных обмоток по формуле

$$T = J_к^2/200, \qquad (10\text{-}2)$$

где $J_к$ — плотность тока в обмотке в режиме короткого замыкания, А/мм².

В первых отечественных сериях начальная скорость нарастания температуры обмотки была равна 10—15°С/с. Это приводило к недопустимым нагревам обмотки в процессе пуска двигателя и к ускоренному разрушению ее витковой изоляции, особенно в случаях недостаточно надежной работы защиты при нарушении контакта в одной из фаз. В последующих сериях начальная скорость нарастания температуры обмотки статора при заторможенном роторе была ограничена значением 7°С/с. При этом надежность двигателей серии А2 АО2 была дополнительно повышена за счет увеличенной механической прочности витковой изоляции.

При современных разработках новых серий электрических машин, когда существуют новейшие освоенные промышленностью изоляционные материалы высокой электрической, механической и тепловой прочности и когда тепловая защита электродвигателей усовершенствована вплоть до введения встроенных в обмотку температурных датчиков, появилась возможность пересмотра предельного значения начальной скорости нарастания температуры обмоток и повышения его до 9,5—10°С/с без ущерба для надежности машин.

Применение в электрических машинах изоляции повышенных классов нагревостойкости с определенным запасом по превышению температуры оказывает положительное влияние на увеличение надежности машин.

Весьма важную роль в повышении надежности электрических машин играет усовершенствование конструкции обмоток статора, ротора и якоря. Широко применяемые всыпные обмотки из круглых проводов обладают существенным недостатком, заключающимся в том, что при укладке проводников в паз («всыпка») с использованием ручных или станочных операций проводники располагаются в пазу беспорядочно, образуя неровности и перехлесты, изоляция проводников в местах пересечений подвергается увеличенным механическим воздействиям и в процессе эксплуатации машин может сравнительно быстро повреждаться, вызывая витковые короткие замыкания, приводящие к отказу. В связи с этим не следует также чрезмерно завышать коэффициент заполнения пазов проводниками, если при этом не принимаются особые технологические меры, обеспечивающие надежную укладку.

Значительно более надежными являются обмотки, выполняемые из прямоугольных проводов, располагаемых в определенном порядке в прямоугольных полуоткрытых или открытых пазах. При этом секции обмотки наматывают, формуют (и, если нужно, изолируют) отдельно, а затем в готовом виде укладывают в пазы. Такие обмотки нашли широкое применение в отечественном электромашиностроении при изготовлении низковольтных асинхронных двигателей мощностью свыше 100 кВт и хорошо себя зарекомендовали в многолетней практике производства и эксплуатации. Двухслойные обмотки, укладываемые в открытые пазы, применяются преимущественно для статоров высоковольтных двигателей, а также для якорей машин постоянного тока.

Нижней границей применения обмоток из прямоугольных проводов в статорах асинхронных двигателей является высота оси вращения 280 мм. Однако возможно применение таких обмоток и для двух- и четырехполюсных двигателей с высотой оси вращения 250 мм. Нижней границей применения открытых прямоугольных пазов для машин постоянного тока является диаметр якоря, равный приблизительно 200 мм. Эта граница может быть понижена при применении утоньшенной витковой и корпусной изоляции.

Повышение надежности всыпных обмоток из круглых проводов могло бы быть достигнуто путем перехода на открытые пазы и рядовое размещение проводов в формованных секциях. Однако вопрос механизации укладки такого рода обмотки в пазы статора асинхронных двигателей пока еще не решен, поэтому она не может конкурировать по трудоемкости изготовления со всыпной обмоткой, укладываемой на автоматических статорообмоточных станках.

Для фазных роторов асинхронных двигателей с высотами оси вращения свыше 250 мм наиболее надежной является двухслойная стержневая обмотка с размещением двух прямоугольных изолированных стержней в прямоугольном полузакрытом пазу. У двигателей с меньшими высотами оси вращения применяются всыпные обмотки и овальные полузакрытые пазы.

Дальнейшее повышение надежности электродвигателей связано с капсулированием лобовых частей термореактивными компаундами. Предполагается, что двигатели с надежно капсулированными обмотками станут в дальнейшем универсальными для применения в любых климатических условиях, включая морские и тропические.

В высоковольтных двигателях диапазона мощностей примерно от 500 до 1000 кВт применяют глубокий паз ротора с алюминиевыми стержнями, которые для повышения надежности закрепляют в открытых пазах расчеканкой. Двигатели с такими роторами, в отличие от

ранее применявшихся роторов с медной клеткой, оказались достаточно надежными в эксплуатации.

Другой разновидностью ротора с глубоким пазом является широко применяемый в настоящее время ротор с заливкой алюминием. Паз при этом может иметь любую форму: сужающуюся к нижней или к верхней части прямоугольника с закругленными краями, бутылки, колбы или лопатки; может состоять из двух расположенных друг над другом пазов (при двухклеточном роторе). Заливка роторов алюминием вошла в отечественную практику для двигателей общего применения мощностью до 400 кВт, а для двигателей взрывонепроницаемых — даже до 1000 кВт и показывает хорошие результаты по надежности таких роторов в эксплуатации.

Существенное влияние на повышение надежности электрических машин оказывает уменьшение уровня вибраций. Вибрации машин, вызванные неуравновешенностью роторов и якорей, вибрации магнитного происхождения и др. передаются на подшипники, ускоряя их износ, и на наиболее уязвимые части машин — обмотки, изоляция которых, особенно в лобовых частях, претерпевая переменные механические усилия, постепенно изнашивается и выходит из строя. Помимо принимаемых против этого явления мер (цементирующие пропитки термореактивными составами, изоляция типа «монолит», специальные крепления лобовых частей и соединительных проводов и т. д.) необходимо решительное подавление самих источников вибраций как в самом двигателе, так и в агрегате (двигатель — приводимый механизм) в целом.

Мероприятия по повышению срока службы подшипников рассмотрены в § 9-3,г.

Весьма эффективным повышением надежности обмоток статоров асинхронных двигателей является применение встроенной температурной защиты. Ее эффективность очевидна из того факта, что, как уже указывалось выше, в 85—95% случаев причиной выхода двигателей из строя является повреждение обмотки статора.

Существенное влияние на уменьшение надежности работы машин постоянного тока оказывает осаждение на ее обмотках пыли от износа щеток. Вопрос решается как применением щеток со сниженным износом, так и соответствующих эмалевых покрытий обмоток и других токоведущих частей для придания им гладкой поверхности с хорошей изоляцией, на которой щеточная пыль не задерживается и которая препятствует образованию проводящих мостиков между обмоткой и корпусом при наличии влаги и попадающей в машину смазки из плохо уплотненных подшипников.

У асинхронных двигателей с фазным ротором, особенно в исполнении IP44, целесообразен соответствующий подбор материалов трущейся пары кольцо — щетка, которые обеспечивали бы наименьший износ, а также наименьшее переходное падение напряжения и, следовательно, наименьшие потери в относительно малом объеме закрытой коробки контактных колец, охлаждаемой внешним обдувом. Наиболее рациональными в применении являются материалы контактных колец и марки щеток, рекомендуемые в § 9-3.

Большое влияние на надежность электрических машин оказывает качество их изготовления. Статистика показывает, например, что из суммы всех отказов асинхронных двигателей около 35% объясняются недостаточно высоким качеством их изготовления, 50% — недостатками эксплуатации и 15% — несоответствием конструкции требованиям эксплуатации. Качество изготовления электродвигателей, особенно при

массовом их производстве, решающим образом зависит от технологичности конструкции, достигнутой при проектировании серии, т. е. от заранее предусмотренной возможности применения широкого комплекса наиболее совершенных современных и перспективных технологических процессов с высокой степенью механизации и автоматизации. Чем выше степень механизации и автоматизации технологических процессов, т. е. чем ниже процент применения ручного труда, тем в большей степени может быть гарантирован высокий и стабильный уровень качества выпускаемых изделий, а следовательно, и их высокая надежность в работе.

При проектировании электрических машин возможен расчет их надежности и долговечности при наличии статистических данных, базирующихся на проведении экспериментов и исследований. На основе этих данных могут быть составлены математические методики расчета надежности отдельных узлов электродвигателей. Примеры составления таких методик приведены в [Л. 5].

Глава одиннадцатая

ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ АКТИВНОЙ ЧАСТИ

11-1. ДИАМЕТРЫ СЕРДЕЧНИКОВ

Основными размерами активной части электрических машин являются: наружный диаметр $D_{н1}$, внутренний диаметр D_1 и длина l_1 сердечника статора у асинхронных двигателей, наружный диаметр станины $D_{н1}$, наружный диаметр якоря $D_{н2}$ и длина l_2 сердечника якоря у двигателей постоянного тока. Эти размеры влияют на все прочие размеры электрических машин (высоту оси вращения, установочные и габаритные размеры), а также на энергетические показатели, рабочие и пусковые характеристики, массу и стоимость машин.

В настоящее время в практике мирового электромашиностроения, особенно в области высоковольтных асинхронных двигателей, наблюдается тенденция повышения номинальных мощностей при неизменных высотах оси вращения. Решающую роль при этом играют бо́льшие удобства потребителей при сочленении двигателей с приводными механизмами, имеющими часто меньшие габариты, чем двигатели (например, центробежные насосы), а также уменьшение моментов инерции роторов или якорей двигателей с меньшими высотами оси вращения при той же номинальной мощности.

Так как эта тенденция сохранится, по-видимому, и в будущем, то электромашиностроителям уже в настоящее время при разработке новых серий следует принимать меры готовности к дальнейшему повышению мощности двигателей без существенной перестройки производства. Одна из этих мер состоит в том, что для каждой высоты оси вращения должен быть предусмотрен наибольший наружный диаметр $D_{н1}$, допускаемый конструкцией и технологией изготовления двигателя. Это обеспечивает наименьшее отношение длины сердечника к его наружному диаметру при данном значении мощности, а также допускаемое

значение этого отношения при возможном повышении мощности и соответствующем удлинении сердечника с учетом применения перспективных материалов и других улучшающих факторов.

Максимально возможный наружный диаметр сердечника статора, мм, в зависимости от высоты оси вращения h может быть найден из следующего выражения:

$$D_{н1}=2(h-h_1), \tag{11-1}$$

где h_1 — минимально допустимое расстояние от нижней части цилиндрической поверхности сердечника статора до опорной плоскости двигателя, мм (рис. 11-1).

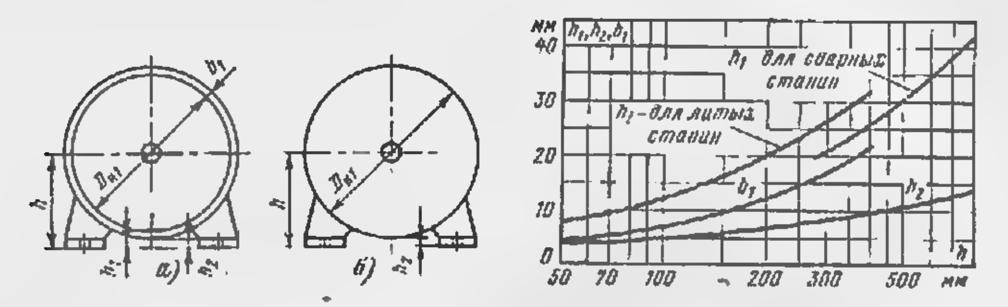


Рис. 11-1. Размеры h; h_1; h_2; b_1; $D_{н1}$ асинхронных двигателей (*а*) и двигателей постоянного тока (*б*).

Рис. 11-2. Средние значения h_1, h_2, $b_1=f(h)$.

Значение h_1 определяется возможностью беспрепятственного введения в лапы двигателя крепящих фундаментных болтов, выполнением замков станин и подшипниковых щитов, креплением кожуха наружного вентилятора двигателей со способами охлаждения IC0041, IC0141, IC0151, а также минимальным допускаемым расстоянием h_2 (рис. 11-1,*а*) от нижней части корпуса машины до опорной плоскости лап; при этом должны учитываться литейные уклоны и допуски на размеры отливок.

В современных сериях асинхронных двигателей наименьшее допустимое значение h_1 в зависимости от высоты оси вращения представлено на рис. 11-2. Приведенные минимальные значения h_1 не относятся к таким асинхронным двигателям в исполнении IP44, которые имеют распределенный трубчатый воздухо-воздушный охладитель. Для этих двигателей обычно берется следующая бо́льшая высота оси вращения и связанные с нею установочные размеры.

Значения h_2 для двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с литыми станинами определяется из рис. 11-2. Для асинхронных двигателей со сварными станинами значение h_2 может быть принято равным 3—5 мм по условиям технологичности конструкции при механической обработке опорной плоскости лап.

Толщина стенки станины b_1 при литье в земляные формы приведена на рис. 11-2. При литье чугуна в металлические кокили, особенно при четырехстороннем радиальном разъеме форм, толщина стенки станины может быть принята на 30—40% меньше, чем при литье в земляные формы. При станине, полученной обливом сердечника статора алюминиевым сплавом под давлением, толщина стенки может быть

взята примерно на 50% меньше, чем при литье в земляные формы по данным рис. 11-2.

В асинхронных двигателях со степенью защиты IP23 сердечник статора сажается на опорные ребра; в этом случае стенки станины могут быть несколько тоньше, чем указано на рис. 11-2.

С учетом изложенных выше соображений для всех проектируемых асинхронных двигателей должна быть обязательно выдержана зависимость

$$h_1 \geqslant h_2 + b_1. \qquad (11\text{-}2)$$

Если значения h_1 существенно больше суммы $h_2 + b_1$, то в нижней части станины закрытых обдуваемых асинхронных двигателей может быть размещено несколько охлаждающих ребер, однако расстояние от верхушек ребер до опорной плоскости двигателя должно быть не менее половины значения h_2, приведенного на рис. 11-2.

Для двигателей постоянного тока наружный диаметр станины $D_{н1}$ (рис. 11-1,б) может быть найден из следующего выражения, мм:

$$D_{н1} = 2(h - h_3), \qquad (11\text{-}3)$$

где значения h_2, мм, те же, что на рис. 11-2.

Расстояние от уплощенного в нижней части кожуха наружного вентилятора двигателей со способами охлаждения IC0041, IC0141, IC0151 до опорной плоскости машины может быть примерно в 2 раза меньше значений h_2, приведенных на рис. 11-2.

Из рис. 11-2 и выражений (11-1)—(11-3) могут быть получены следующие аналитические зависимости наибольших возможных диаметров $D_{н1}$ от высоты оси вращения h:

для асинхронных двигателей

$$D_{н1} = h(2 - h^{-x}); \qquad (11\text{-}4)$$

для двигателей постоянного тока

$$D_{н1} = h(2 - 0{,}32h^{-0{,}18}), \qquad (11\text{-}5)$$

где $x = 0{,}3$ для двигателей с литой станиной и 0,34 для двигателей со сварной станиной (а также для всех перспективных двигателей с $h \geqslant 280$ мм).

11-2. СВЯЗЬ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ НАГРУЗКАМИ И ОСНОВНЫМИ РАЗМЕРАМИ

Основные размеры сердечника электрической машины связаны определенной зависимостью с мощностью, частотой вращения, линейной нагрузкой статора или якоря и магнитной индукцией в воздушном зазоре.

Как известно [Л. 24], подводимая мощность P_1 выражается через расчетную (внутреннюю) мощность P' следующим образом:

для асинхронных двигателей, В·А,

$$P_1 = P'_1 / k_e,$$

где k_e — отношение э. д. с. фазы обмотки статора E_1 к номинальному фазному напряжению U_1;

для двигателей постоянного тока, Вт,

$$P_1 = P'_1 / k_e k_i,$$

где k_e — отношение э. д. с. якоря E_2 к номинальному напряжению U; k_i — отношение тока якоря I_2 к номинальному току двигателя I при параллельном возбуждении, при последовательном или независимом возбуждении $k_i = 1$.

Пользуясь этими соотношениями, а также известными зависимостями [Л. 24] между расчетной мощностью и основными размерами сердечника, частотой вращения, электромагнитными нагрузками и отдельными коэффициентами, можно получить следующие выражения для подводимой мощности, приходящейся на единицу длины сердечника:

для асинхронных двигателей, В·А/мм,

$$\frac{P_1}{l'_1} = \frac{D^2_1 n_1 k_{об1} A_1 B_\delta}{8{,}62 \cdot 10^7 k_e}, \qquad (11\text{-}6)$$

где l'_1 — расчетная длина сердечника статора, равная его конструктивной длине без учета длины радиальных каналов (см. § 14-2), мм; D_1 — внутренний диаметр сердечника статора, мм; n_1 — синхронная частота вращения, об/мин; $k_{об1}$ — обмоточный коэффициент обмотки статора для основной гармонической э. д. с.; A_1 — линейная нагрузка обмотки статора, А/см; B_δ — максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Т;

для двигателей постоянного тока, Вт/мм,

$$\frac{P_1}{l'_1} = \frac{D^2_{н2} n \alpha' A_2 B_\delta}{6{,}1 \cdot 10^7 \cdot k_e k_i}, \qquad (11\text{-}7)$$

где $D_{н2}$ — наружный диаметр якоря, мм; l'_2 — расчетная длина сердечника якоря, равная его конструктивной длине без учета длины радиальных каналов (см. § 17-2), мм; n — частота вращения, об/мин; α' — расчетный коэффициент полюсной дуги, равный отношению расчетной полюсной дуги к полюсному делению (см. § 17-2); A_2 — линейная нагрузка якоря, А/см.

При заданных мощности и частоте вращения основные размеры машины определяются главным образом значениями электромагнитных нагрузок. Чем больше значения A и B_δ, тем меньше основные размеры и тем лучше используются активные материалы в машине. Однако значения A и B_δ не могут выбираться произвольно, поскольку они тесно связаны с другими параметрами машины. Предел допустимых электромагнитных нагрузок определяется условиями охлаждения, степенью защиты, классом нагревостойкости изоляции, качеством электротехнической стали, частотой вращения, назначением машины. Нагрев обмоток определяется произведением линейной нагрузки на плотность тока (AJ), пропорциональным плотности теплового потока. Это произведение характеризует структуру зубцовой зоны статора, ротора или якоря, т. е. соотношение поперечного сечения проводникового материала в пазах и стали в зубцах, и зависит как от размеров пазов (а следовательно, и зубцов), так и от коэффициентов заполнения пазов медью и сердечников сталью. Кроме того, соотношение между значениями A и B_δ должно находиться в определенных пределах, при которых обеспечиваются необходимые технические показатели и рабочие характеристики машины.

Учитывая целесообразность проектирования электродвигателей с наибольшими возможными значениями диаметров $D_{н1}$ при данных высотах оси вращения h (см. § 11-1), а также то, что отношения $D_1/D_{н1}$ и $D_{н2}/D_{н1}$ носят для каждого числа полюсов достаточно закономерный характер (см. рис. 14-3 и 17-7), зависимости (11-6) и (11-7) удобнее выразить через наружный диаметр $D_{н1}$.

Для асинхронных двигателей отношение внутреннего диаметра сердечника статора к наружному

$$D_1/D_{н1} = K_1 D_{н1}^{\delta}, \text{ или } D_1 = K_1 D_{н1}^{1+\delta}. \tag{11-8}$$

Аналогично для двигателей постоянного тока отношение наружного диаметра сердечника якоря к наружному диаметру станины

$$D_{н2}/D_{н1} = K_1 D_{н1}^{\delta}, \text{ или } D_{н2} = K_1 D_{н1}^{1+\delta}. \tag{11-9}$$

В частном случае, когда отношения $D_1/D_{н1}$ и $D_{н2}/D_{н1}$ при данном числе полюсов с ростом диаметра $D_{н1}$ не изменяются, показатель степени $\delta=0$, а диаметр $D_1 = K_1 D_{н1}$ и соответственно диаметр $D_{н2} = K_1 D_{н1}$.

У правильно спроектированной серии электродвигателей изменение значений A и B_δ, а также ряда других параметров в зависимости от диаметров D_1, $D_{н2}$ и $D_{н1}$ носит закономерный характер и может быть выражено степенными функциями. В частности, для асинхронных двигателей в зависимости от диаметра D_1

$$A_1 = K_2 D_1^{\alpha}; \tag{11-10}$$

$$B_\delta = K_3 D_1^{\beta}; \tag{11-11}$$

$$A_1 B_\delta = K_2 K_3 D_1^{\alpha+\beta} = K_2 K_3 D_1^{\gamma}. \tag{11-12}$$

Для двигателей постоянного тока в зависимости от диаметра $D_{н2}$

$$A_2 = K_2 D_{н2}^{\alpha}; \tag{11-13}$$

$$B_\delta = K_3 D_{н2}^{\beta}; \tag{11-14}$$

$$\alpha' = K_4 D_{н2}^{\varepsilon}; \tag{11-15}$$

$$k_e = K_5 D_{н2}^{\theta}; \tag{11-16}$$

$$k_i = K_6 D_{н2}^{\sigma}. \tag{11-17}$$

Для асинхронных двигателей уравнение (11-6) с учетом (11-8) и (11-12), а также зависимости $n_1 = 60 f_1/p$ примет вид:

$$P_1/l'_1 = K D_{н1}^{(2+\gamma)(1+\delta)} = K D_{н1}^{2+\gamma'}, \tag{11-18}$$

где

$$K = K_1^{2+\gamma} K_2 K_3 k_{об1} f_1 / 144 \cdot 10^4 k_e p;$$

$$\gamma' = \gamma + (2+\gamma)\delta;$$

при $\delta=0$ $\gamma'=\gamma$.

Для двигателей постоянного тока уравнение (11-7) с учетом (11-9) и (11-13)—(11-17) примет вид:

$$P_1/V'_2 = KD_{н1}^{(2+\gamma)(1+\delta)} = KD_{н1}^{2+\gamma'}, \qquad (11\text{-}19)$$

где

$$K = K_1^{2+\gamma} K_2 K_3 K_4 n_1 / 6{,}1 \cdot 10^4 K_5 K_6; \ \gamma = \alpha + \beta + \xi - \theta - \rho; \ \gamma' = \gamma + (2+\gamma)\delta;$$

при $\delta = 0$ и $\gamma' = \gamma$.

Значения коэффициентов $k_{об1}$, $k_{н}$, K_1, K_2, K_3 при одном и том же числе полюсов для асинхронных двигателей и коэффициентов K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6 для двигателей постоянного тока при одной и той же частоте вращения практически мало изменяются, поэтому для данного участка серии эти коэффициенты, а следовательно, и коэффициент K можно с достаточным приближением считать постоянными.

11-3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ

При проектировании новых серий асинхронных двигателей, в особенности рассчитанных на массовое или крупносерийное производство в диапазоне мощностей от долей киловатта и примерно до 100 кВт, для определения основных размеров активной части машин применяется метод, основанный на отыскании минимума суммы затрат. Этим методом, изложенным в гл. 8, при применении современных прогрессивных электротехнических материалов и технологических процессов и проведении всех поисковых расчетов на ЭВМ можно определить целесообразный уровень энергетических показателей, а также соответствующие этому уровню размеры сердечников и массу двигателей вновь проектируемой серии.

При проектировании серий, имеющих относительно ограниченный выпуск однотипных машин, определение рационального уровня использования активной части можно вести, учитывая современные достижения в области электроизоляционных и магнитных материалов, при условии сохранения или некоторого повышения энергетических показателей у асинхронных двигателей, улучшения регулировочных и других характеристик у машин постоянного тока. При таком подходе проектируемые машины по массо-габаритным и энергетическим показателям могут оказаться не вполне оптимальными. Однако, как уже указывалось в гл. 8, кривая зависимости суммы затрат от массы машины имеет в зоне минимума обычно настолько пологий характер, что даже довольно значительные отклонения массы в ту или другую сторону от оптимального значения не сказываются существенно на отклонениях суммы затрат от минимального значения, поэтому при условии серийного (не массового) выпуска машин такая неточность в определении оптимума может быть допущена.

Для предварительного определения уровня использования активной части машин проектируемой серии, т. е. для установления при выбранных диаметрах сердечников их длин, воспользуемся зависимостями, выведенными в § 11-2.

Выражения (11-18) и (11-19) дают возможность определить длины сердечников машин проектируемой серии, соответствующие любым вариантам выбираемых диаметров сердечников (или станин) при значе-

ниях $\lambda = l/D$, лежащих в целесообразных пределах. Расчетная длина сердечника:

для асинхронных двигателей

$$l'_1 = P_1/KD_{н1}^{2+\gamma'};\qquad(11\text{-}20)$$

для двигателей постоянного тока

$$l'_2 = P_1/KD_{я1}^{2+\gamma'}.\qquad(11\text{-}21)$$

Зная для проектируемой серии электрических машин числовые значения коэффициентов K и показателя степени $2-\gamma'$ и имея для данного стандартного ряда высот оси вращения h ряд выбранных либо наибольших, либо иных согласованных диаметров $D_{н1}$, а также пользуясь заданной шкалой мощностей, увязанной надлежащим образом с высотами оси вращения, можно определить длины сердечников для всех входящих в серию диаметров $D_{н1}$ при всех числах полюсов или частотах вращения, если принять в первом приближении уровень энергетических показателей для перехода от мощности P_2 к мощности P_1 таким же, как в существующей серии аналогичных машин.

Значение коэффициента K при переходе от одной длины сердечника к другой может несколько изменяться вследствие различных условий охлаждения коротких и длинных машин, из-за необходимости улучшения энергетических показателей машин с более короткими сердечниками или в результате унификации длин сердечников у асинхронных двигателей с различными числами полюсов и у двигателей постоянного тока с различными частотами вращения. Уточнение длин сердечников производится при последующих электромагнитных и тепловых расчетах машин. Числовые значения коэффициента K и показателя степени $2+\gamma$ в (11-18) и (11-19), присущие проектируемой серии машин, могут быть определены путем расчета или экспериментального исследования отдельных опытных и макетных образцов машин, являющихся базовыми точками проектируемой серии и относящихся к наименьшему и наибольшему диаметрам.

Определение числовых значений K и $2+\gamma'$ может быть выполнено также и на основании исследования существующей аналогичной серии машин. Для этого в логарифмическом масштабе строится зависимость $P_1/l'_1 = f(D_{н1})$, представляющая собой уравнение прямой:

$$\lg\frac{P_1}{l'_1} = \lg K + (2+\gamma')\lg D_{н1}.\qquad(11\text{-}22)$$

Показатель степени $2+\gamma'$ определяется тангенсом угла наклона этой прямой к оси абсцисс, а коэффициент K пересечением прямой с осью ординат, проходящей через точку на оси абсцисс со значением $D_{н1}=1$; или он может определяться как среднее из нескольких значений, полученных решением уравнений (11-18) или (11-19) при известных значениях $D_{н1}$, $2+\gamma'$ и P_1/l'_1, взятых из построенного графика. Прямые, построенные для различных чисел полюсов или частот вращения данной серии, должны быть расположены параллельно, так как показатель степени $2+\gamma'$ для всех чисел полюсов или частот вращения один и тот же (см. рис. 14-1 и 17-8).

При определении основных размеров сердечников проектируемой серии необходимо учесть увеличение коэффициента K, обусловленное всем комплексом улучшающих факторов, вводимых в проектируемую серию по сравнению с существующей. Порядок определения новых значений коэффициента K изложен в § 11-4.

Найденные таким способом длины сердечников позволяют внести необходимые коррективы в увязку мощностей со стандартными установочными размерами (избежать неблагоприятных значений $\lambda = l'_1/D_{н1}$ путем, например, перевода данной машины в соседнюю большую или меньшую высоту оси вращения и т. д.) и получить таким образом рациональную структуру проектируемой серии — основу дальнейших разработок в области расчета и конструкции.

11-4. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА K

Если принять для проектируемой серии показатель степени $2+\gamma'$ при D_1 таким же, как и у существующей аналогичной серии, то излагаемыми ниже способами можно сравнительно просто и с достаточной для практического пользования точностью определить новые значения коэффициента K в (11-18) или (11-19), соответствующие всему комплексу улучшающих факторов, т. е. более высокому заполнению пазов проводниковым материалом (в результате перехода на более тонкую изоляцию), большей магнитной проницаемости и меньшим удельным потерям электротехнической стали, более высоким допускаемым превышениям температуры обмоток при переходе на новый класс нагревостойкости изоляции, более совершенным условиям охлаждения и т. п.

Увеличение K, связанное с повышением коэффициента заполнения пазов проводниковым материалом (медью), можно определить условным пересчетом сечения паза статора или якоря серии-прототипа с учетом сохранения прежнего сечения меди и соответствующего уменьшения толщины корпусной и витковой изоляции. При этом для рассматриваемой частоты вращения и наиболее характерных по отношениям высоты к ширине групп пазов существующей серии, а также для наибольших и наименьших чисел проводников в пазу следует вычислить коэффициент заполнения паза медью:

$$k_м = N_п q / Q_п, \tag{11-23}$$

где $N_п$ — число проводников в пазу; q — сечение проводника, мм²; $Q_п$ — сечение паза в штампе, мм²; затем определить новое сечение паза, равное $Q_п - \Delta Q_п$, где $\Delta Q_п$ — суммарное уменьшение поперечного сечения корпусной и витковой изоляции в пазу, мм².

Новый повышенный коэффициент заполнения паза медью

$$k'_м = N_п q / (Q_п - \Delta Q_п). \tag{11-24}$$

Соответственно увеличенный коэффициент K' равен:

$$K' = K k'_{п.м}, \tag{11-25}$$

где $k'_{п.м}$ — коэффициент повышения мощности при относительном увеличении коэффициента заполнения пазов медью.

Коэффициент $k'_{п.м}$ определяется эмпирической формулой

$$k'_{п.м} = 1 + 0{,}64 \left[\frac{1}{\left(\sqrt{\frac{0{,}5}{k'_м / k_м}} + 0{,}5 \right)^n} - 1 \right]. \tag{11-26}$$

Изменение коэффициента K, связанное с переходом на изоляционные материалы других классов нагревостойкости и, следовательно, на

другие температуры нагрева активных частей машины, можно определить из следующей зависимости:

$$K''=Kk''_{п.м}, \qquad (11\text{-}27)$$

где $k''_{п.м}$ — коэффициент повышения мощности машины при переходе на другие допускаемые превышения температуры обмоток статора или якоря.

Коэффициент $k''_{п.м}$ можно приближенно определить по формуле

$$k''_{п.м}=\sqrt{\frac{\Delta\vartheta_{доп2}-\Delta\vartheta_0}{\Delta\vartheta_{доп1}-\Delta\vartheta_0}}, \qquad (11\text{-}28)$$

где $\Delta\vartheta_{доп1}$ — допускаемое превышение температуры обмотки при классе нагревостойкости изоляции машин существующей серии; $\Delta\vartheta_{доп2}$ — допускаемое превышение температуры обмотки при выбранном для проектируемой серии классе нагревостойкости изоляции; $\Delta\vartheta_0$ — превышение температуры обмотки при холостом ходе машины, равное примерно 15—20°С.

Переход на электротехнические стали, обладающие большей магнитной проницаемостью и меньшими удельными потерями, соответственно увеличивает коэффициент K до значения

$$K'''=Kk'''_{п.м}, \qquad (11\text{-}29)$$

где $k'''_{п.м}$ — коэффициент повышения мощности машины при переходе на другую марку стали.

При переходе со стали марок 1211 и 1212 на холоднокатаную нелегированную сталь марки 2013 (см. гл. 7) коэффициент повышения мощности $k'''_{п.м}$, как показывают многочисленные расчеты на ЭВМ и экспериментальные данные, в среднем составляет 1,1.

В результате совместного действия указанных факторов: уменьшения толщины изоляции, перехода на изоляционные материалы другого класса нагревостойкости и улучшения свойств электротехнической стали — коэффициент K для проектируемой серии будет равен:

$$K'=Kk'_{п.м}k''_{п.м}k'''_{п.м}. \qquad (11\text{-}30)$$

Глава двенадцатая

СТРУКТУРА СЕРИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

12-1. ШКАЛА МОЩНОСТЕЙ И ЕЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

В основе серийного ряда электродвигателей лежит шкала номинальных мощностей с коэффициентом нарастания $k_{п.м2}$, равным отношению последующей мощности P''_2 к предыдущей P'_2, т. е.

$$k_{п.м2}=P''_2/P'_2. \qquad (12\text{-}1)$$

Для рационально построенной серии (с закономерным рядом диаметров и длин сердечников) коэффициент $k_{п.м2}$ должен закономерно из-

меняться в диапазоне мощностей всей серии или отдельных ее участков. Однако, как уже указывалось в § 2-1, современные стандартные ряды мощностей (за исключением рядов свыше 160 кВт) не отличаются особой закономерностью; но в них все же наблюдается определенная тенденция уменьшения коэффициента $k_{н.м2}$ по мере роста мощностей. Это уменьшение $k_{н.м2}$ вполне оправдано с точки зрения электропривода: электродвигатели малых мощностей, имеющие очень широкую область применения, выбираются для приводимых механизмов обычно не с такой степенью точности, как двигатели больших мощностей.

Вместе с тем увеличение коэффициента $k_{н.м2}$ по мере перехода к меньшим мощностям является вполне естественным также и с точки зрения возможности обеспечения рациональной структуры серии. Действительно, даже при неизменном коэффициенте нарастания подводимой мощности $k_{н.м1}$ коэффициент нарастания полезной мощности $k_{н.м2}$ обязательно будет увеличиваться по мере перехода к меньшим мощностям из-за снижения энергетических показателей двигателей и увеличивающегося тем самым расхождения между мощностями P_1 и P_2. Особенно значительно это расхождение в двигателях с низкими частотами вращения и в двигателях мощностью менее 11 кВт.

Для современного уровня электромашиностроения коэффициент нарастания полезной мощности в идеальной шкале мощностей может быть выражен эмпирической формулой

$$k_{н.м2}=k'_{н.м2}P_2^{-0,025}, \qquad (12\text{-}2)$$

где $k'_{н.м2}$ — коэффициент, зависящий от числа ступеней шкалы в данном диапазоне мощностей; для современных шкал мощностей $k'_{н.м2}=1,35\div1,40$.

Пользуясь выражением (12-2), можно построить закономерную шкалу мощностей. При этом каждая последующая мощность P''_2 будет равна:

$$P''_2=k'_{н.м2}(P'_2)^{0,975}.$$

Однако шкала мощностей для современных серий электродвигателей не строится каждый раз заново, а принимается в виде стандартизованного в международном масштабе ряда, который в идеале должен представлять собою наиболее рациональную комбинацию из рядов предпочтительных чисел.

12-2. РЯД ДИАМЕТРОВ И ДЛИН СЕРДЕЧНИКОВ

Основной частью структуры серии электродвигателей является также ряд закономерно нарастающих наружных диаметров сердечника статора или станины $D_н$. Коэффициент нарастания диаметров $D_н$ находится в прямой зависимости от коэффициента нарастания стандартных высот оси вращения h. С достаточной степенью точности можно принять значения этих коэффициентов нарастания одинаковыми.

Число длин сердечника, приходящихся на данный диаметр, является третьим основным элементом структуры серии.

В современных сериях электродвигателей как в Советском Союзе, так и за рубежом число длин, приходящихся на диаметр, принимается обычно равным двум, и только изредка, когда получаются для данного диаметра недопустимо длинные сердечники, принимается одна длина; три

длины возможны в тех случаях, когда требуется обеспечить надлежащую стыковку по шкале мощностей двух серий: старой серии предыдущего участка и новой, имеющей бо́льшие мощности на соседней большей высоте оси вращения. У двигателей постоянного тока в ряде случаев предусматриваются три и более длин сердечника, в частности, у машин мощностью свыше 200 кВт.

Большое значение при проектировании серий электродвигателей имеет определение наиболее целесообразного отношения $l_1/D_{н1}=\lambda$, особенно для вторых (или наибольших) длин сердечников. Критерием оптимума λ может быть наименьший расход материалов, минимум суммы затрат, наибольшая производственная технологичность конструкции и т. п. (см. гл. 8).

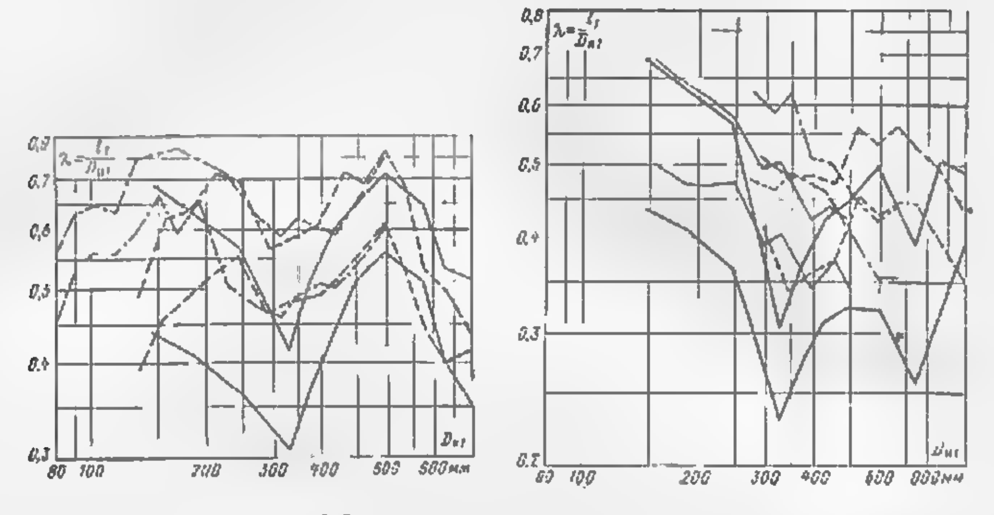


Рис. 12-1. Зависимость $\lambda=f(D_{н1})$ четырехполюсных асинхронных двигателей со степенью защиты IP44.

——— — серия АО, — — — — серия АО2; —·—·—·— серия 4А.

Рис. 12-2. Зависимость $\lambda=f(D_{н1})$ четырехполюсных асинхронных двигателей со степенью защиты IP23.

——— — серия АД, МА-200; ——— — серия А; — — — — серия А2; —·—·— серия 4А

Проведенные на ЭВМ расчеты с поиском оптимальных вариантов показывают, что $\lambda=0,8$ при минимуме суммы затрат; 0,65 и 0,4 — при минимальных расходах обмоточной меди и электротехнической стали (соответственно); 0,55 при минимальной массе двигателя. Для обеспечения технологичности конструкции при штамповке, сборке сердечников и укладке обмотки значение λ не должно превышать примерно 0,75—0,80.

Графики зависимости расхода материалов и суммы затрат от значения λ, полученные на основании упомянутых выше расчетов на ЭВМ, имеют очень пологий характер. Например, переход с экономически оптимального по сумме производственных и эксплуатационных затрат отношения $\lambda=0,8$ на $\lambda=0,6$, соответствующее минимуму массы активных материалов и двигателя в целом, связан с увеличением суммы затрат всего на 2—3%. Это свидетельствует о том, что при проектировании новых серий можно допускать вариации значений λ в достаточно широких пределах.

Рассмотрение серий отечественных асинхронных двигателей различных исполнений по степени защиты показывает, что зависимости $\lambda = f(D_{н1})$, представленные на рис. 12-1 и 12-2 (графики даны для первых и вторых длин сердечника), имеют довольно хаотичный характер. Однако несмотря на эту хаотичность все же намечаются некоторые закономерности: для двигателей со степенью защиты IP44 имеется определенная тенденция сохранения отношения λ для всего ряда диаметров примерно на одном и том же уровне (около 0,55—0,75 для вторых длин сердечников и 0,4—0,6 для первых длин); для двигателей со степенью защиты IP23 имеется тенденция уменьшения λ по мере роста диаметра (для вторых длин сердечников от 0,6—0,7 для малых диаметров до 0,45—0,55 для больших и соответственно для первых длин сердечников от 0,4—0,5 для малых диаметров до 0,3—0,4 для больших).

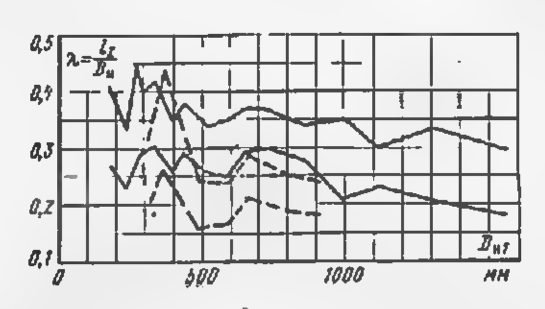


Рис. 12-3. Зависимость $\lambda = f(D_{н1})$ двигателей постоянного тока.
— серия П; — — — — серия ПН.

Такой характер изменения λ в серийных рядах асинхронных двигателей вполне закономерен. У двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 тепло отводится в основном внешней цилиндрической (обычно оребренной) поверхностью, размеры которой, зависящие при данном диаметре сердечника $D_{н1}$ от длины его l', ограничены максимально допустимым по технологическим и конструкционным соображениям отношением λ (имеется в виду наибольшая из длин сердечника для данного диаметра). Это и обусловливает выбор для таких машин приблизительно постоянных или несколько уменьшающихся для всего ряда диаметров значений λ. У машин со степенью защиты IP23 отвод тепла происходит непосредственно от лобовых частей обмоток статора и ротора, от спинки сердечника статора, а также от пазовых частей обмоток и сердечников ротора и статора через радиальные или аксиальные вентиляционные каналы. Различия в условиях охлаждения приводят к тому, что мощность двигателей по мере увеличения объема их активной части $D^2_{н1}l$ растет неодинаково, а именно, быстрее у машин со степенью защиты IP23, что и обусловливает при заданной шкале мощностей постепенное уменьшение у них отношения λ по мере перехода на последующие бо́льшие диаметры сердечника.

Для серийных двигателей постоянного тока, у которых длины сердечников двигателей различных исполнений по степени защиты унифицированы, значения λ (рис. 12-3) имеют тенденцию к постепенному уменьшению по мере роста диаметра (от 0,40—0,45 до 0,25—0,30 для вторых длин сердечников и от 0,25—0,30 до 0,15—0,20 для первых длин). Следует отметить, что опыт проектирования и изготовления ряда машин постоянного тока как в СССР, так и за рубежом показал возможность и целесообразность повышения значений λ, приведенных на рис. 12-3.

Различия в условиях охлаждения двигателей со степенями защиты IP23 (IP22) и IP44 приводят к различным значениям показателя степени $2+\gamma'$ в (11-18) и (11-19) и коэффициента K (табл. 12-1, 12-2).

Таблица 12-1

Значения коэффициента K и показателя степени $2+\gamma'$ для современных отечественных серий асинхронных двигателей на номинальные напряжения до 660 В

Серия	Диапазон мощностей, кВт	$2p$	Исполнение по степени защиты, способ охлаждения	K	$2+\gamma'$
АО2	13—100	4	IP44, IC0141	0,880	2,45
4А	0,12—0,75	4	IP44, IC0141	1,010	3,0
4А	1,1—11	4	IP44, IC0141	1,150	2,5
4А	15—90	4	IP44, IC0141	1,400	2,3
4А	110—315	4	IP44**, IC0141	1,650	2,2
АО2—АОК2*	250—800	6	IP44***, IC0151	0,330	2,8
А2	13—100	4	IP23, IC01	0,750	2,8
А3—АК3	110—315	6	IP23, IC01	0,575	2,8
4АН	18,5—110	4	IP23, IC01	1,250	2,6
4АН—4АНК	90—250	6	IP23, IC01	0,575	2,8
А2—АК2*	200—1000	6	IP23, IC01	0,405	2,8

* Номинальное напряжение 6000 В. ** С продуваемым ротором.

*** С распределенным воздухо-воздушным охладителем.

Примечание. Приведенные в таблице значения коэффициента K относятся к $D_{н1}$ и l, выраженным в дециметрах (для более простого оперирования при вычислениях).

Таблица 12-2

Значения коэффициента K и показателя степени $2+\gamma'$ для современных отечественных серий двигателей постоянного тока

Серия	Диапазон мощностей, кВт	Номинальное напряжение, В	$2p$	Исполнение по степени защиты, способ охлаждения	K	$2+\gamma'$
П	0,3—2,2	≤220	2	IP22, IC01	0,185	2,6
П	3,2—14	≤440	4	IP22, IC01	0,225	2,9
П	19—200	≤440	4	IP22, IC01	0,200	3,05
П	200—500	≤750	4	IP23, IP44, IC17, IC37	0,061	3,2
П	660—1250	≤750	6	IP23, IP44, IC17, IC37	0,047	3,35
ПО	0,2—1,5	≤220	2	IP44, IC0141	0,140	2,4
ПР	4,2—9,5	≤440	4	IP44*	0,240	2,5
ПР	13,5—90	≤440	4	IP44*	0,275	2,5
ПБ	0,15—1	≤220	2	IP44, IC0041	0,115	2,25
ПБ	1,2—4	≤440	4	IP44, IC0041	0,155	2,25
ПБ	6—12	≤440	4	IP44, IC0041	0,320	1,95

* С воздухоохладителем.

Примечания: 1. Номинальная частота вращения всех двигателей 1500 об/мин, за исключением двигателей серии П в диапазонах 200—500 и 660—1250 кВт, мощности которых приведены к частоте вращения 1000 об/мин. 2. Приведенные в таблице значения коэффициента K относятся к $D_{н1}$ и l, выраженным в дециметрах (для более простого оперирования при вычислениях).

Из табл. 12-1, 12-2 видно, что значения показателя степени $2+\gamma'$ существенно больше для машин в исполнении IP23, чем в IP44. Исключение составляют высоковольтные двигатели серии А2—АК2 и АО2—АОК2, у которых показатель степени $2+\gamma'$ одинаков для обоих исполнений по степени защиты и равен 2,8. Объясняется это тем, что внутренняя система вентиляции для обоих исполнений является в данном случае одинаковой — двусторонней радиальной. Различие заключается лишь в способе охлаждения воздуха внутри двигателя (обмен воздуха, заби

раемого из окружающей среды, для двигателей исполнения IP23 и применение воздухо-воздушного охладителя для двигателей исполнения IP44).

В табл. 12-1 и 12-2 данные приведены для отдельных чисел полюсов или отдельных значений частоты вращения. При других числах полюсов или других значениях частоты вращения показатель степени $2+\gamma'$ остается для данной серии или ее участка неизменным, а коэффициент K, как это видно из (11-18) и (11-19), уменьшается с увеличением чисел полюсов или с уменьшением частоты вращения. Значения коэффициента K и показателя степени $2+\gamma'$ для двигателей современных серий при всех частотах вращения могут быть взяты по рис. 14-1 и 17-8. При этом показатель степени $2+\gamma'$ определяется тангенсом угла наклона прямых (или касательных в данной точке) к оси абсцисс, а коэффициент K при известных значениях P_1/l, $D_{н1}$ и $2+\gamma'$ рассчитывается по (11-18) или (11-19).

12-3. СВЯЗЬ МЕЖДУ ПОЛЕЗНОЙ И ПОДВОДИМОЙ МОЩНОСТЯМИ И СВЯЗЬ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТАМИ НАРАСТАНИЯ ЭТИХ МОЩНОСТЕЙ

Отношение подводимой мощности асинхронных двигателей, кВ·А, к полезной, кВт, может быть представлено следующим образом:

$$P_1/P_2 = 1/\eta\cos\varphi = k_{м12}P_2^{-b}. \qquad (12\text{-}3)$$

Отсюда $P_1 = k_{м12}P_2^{1-b}$.

Аналогично для двигателей постоянного тока

$$P_1/P_2 = 1/\eta = k_{м12}P_2^{-b}. \qquad (12\text{-}4)$$

Отсюда $P_1 = k_{м12}P_2^{1-b}$.

Здесь коэффициент $k_{м12}$ и показатель степени $1-b$ можно определить из зависимости $\eta\cos\varphi = f(P_2)$ для асинхронных двигателей и $\eta = f(P_2)$ для двигателей постоянного тока. В табл. 12-3 приведены в качестве примера значения этих параметров для отдельных участков серий двигателей при одной из охватываемых ими частот вращения.

Таблица 12-3

Значения $k_{м12}$ и $(1-b)$ для двигателей с частотой вращения 1500 об/мин

Род двигателей	Диапазон мощностей, кВт	Исполнение по степени защиты			
		IP23, IP22		IP44	
		$k_{м12}$	$1-b$	$k_{м12}$	$1-b$
Асинхронные	0,06—11	—	—	1,62	0,860
	15—110	1,51	0,948	1,39	0,966
Постоянного тока	0,18—11	1,41	0,88	1,44	0,88
	15—110	1,27	0,965	1,32	0,955

Связи между мощностями P_2 и P_1 соответствует определенная связь и между коэффициентами нарастания $k_{н.м2}$ и $k_{н.м1}$.

С учетом (12-3), (12-4) имеем:

$$P''_1 = P'_1 k_{н.м1} = k_{м12} (P'_2 k_{н.м2})^{1-b}, \qquad (12\text{-}5)$$

где P'_1 и P''_1 — подводимые мощности, соответствующие соседним по шкале номинальным стандартным мощностям.

Отсюда коэффициент нарастания подводимой мощности для данного диапазона мощностей и данных чисел полюсов или частот вращения равен:

$$k_{н.м1} = k_{н.м2}^{1-b}. \qquad (12\text{-}6)$$

12-4. КОЭФФИЦИЕНТЫ НАРАСТАНИЯ НАРУЖНЫХ ДИАМЕТРОВ, МОЩНОСТЕЙ, ДЛИН СЕРДЕЧНИКОВ И СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ

Для дальнейших выводов используем (11-18) и (11-19), из которых получаем:

$$\lambda = l'_1 / D_{н1} = P_1 / K D_{н1}^{3+\gamma'}. \qquad (12\text{-}7)$$

Определим коэффициент $k_{н\lambda}$ нарастания отношения λ. Он будет зависеть от структуры серии, т. е. от числа длин сердечников n, приходящихся на диаметр, и от коэффициента нарастания наружного диаметра $k_{н.д}$. При учете (12-6) имеем:

$$k_{н\lambda} = k_{н.м2}^{n(1-b)} / k_{н.д}^{3+\gamma'}. \qquad (12\text{-}8)$$

В пределах одного наружного диаметра, т. е. при $k_{н.д}=1$, получим выражение для коэффициента нарастания отношения λ машин, отличающихся длиной сердечника (при неизменном числе полюсов или одной и той же частоте вращения):

$$k_{н\lambda} = k_{н.м2}^{n(1-b)}. \qquad (12\text{-}9)$$

Из (12-8) может быть получена зависимость $k_{н.д}$ от $k_{н\lambda}$ и $k_{н.м2}$:

$$k_{н.д} = (k_{н.м2}^{n(1-b)} / k_{н\lambda})^{1/(3+\gamma')}. \qquad (12\text{-}10)$$

12-5. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ДЛИНАМИ СЕРДЕЧНИКОВ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ИСПОЛНЕНИЯХ ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ

В сериях электродвигателей на тех их участках, где предусмотрены двигатели обоих исполнений по степени защиты, т. е. IP44 и IP23 (или IP22), имеется определенная закономерная связь между длинами сердечников того и другого исполнения.

Если принять, что уровень энергетических показателей двигателей в исполнениях IP44 и IP23 (IP22) при одной и той же мощности практически одинаков (т. е. если одинаковы значения $1-b$) и одинаково число длин сердечника, приходящихся на один диаметр (n=const), и что для обоих исполнений использован один и тот же ряд диаметров $D_{н1}$ (т. е. значение коэффициента $k_{н.д}$ для них одно и то же), то на основании (12-8) получим зависимость:

$$k_{н\lambda IP23(IP22)} = k_{н\lambda IP44} k_{н.д}^{\gamma'_{IP44} - \gamma'_{IP23(IP22)}}. \qquad (12\text{-}11)$$

Если принять на основании анализа, проведенного в § 12-2, для асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 λ=const, т. е. $k_{н\lambda IP44}=1$, то (12-11) примет вид:

$$k_{н\lambda IP23}=k_{н.д}^{\gamma'_{IP44}-\gamma'_{IP23}}. \qquad (12\text{-}12)$$

Подставив для примера в (12-12) значения $\gamma'_{IP44}=0{,}3$ и $\gamma'_{IP23}=0{,}6$ на основании данных табл. 12-1 для серии двигателей 4А—4АН, получим:

$$k_{н\lambda IP23}=0{,}3-0{,}6=-0{,}3.$$

Следовательно, в серии двигателей с предположенной выше структурой (т. е. при λ_{IP44}=const) отношение λ_{IP23} будет по мере роста диаметров $D_{н1}$ уменьшаться согласно (12-12) пропорционально корню степени 1/0,3=3,33 из коэффициента нарастания диаметров $k_{н.д}$. И наоборот, увеличиваться в такой же пропорции по мере уменьшения диаметров. Это подтверждает отмеченную выше тенденцию изменения λ на рис. 12-1 и 12-2.

12-6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СЕРИИ

Для серии низковольтных асинхронных двигателей в исполнении IP44 с высотами оси вращения до 250 мм, у которых вполне логичным является, как указывалось выше (§ 12-2), сохранение отношения λ= =const для всего ряда диаметров, можно, имея ту или иную рациональную шкалу мощностей, установить соответствующий этой шкале рациональный ряд диаметров $D_{н1}$. И наоборот, имея рациональный ряд диаметров, установить соответствующую этому ряду шкалу мощностей.

При $\lambda=l/D_{н1}$—const выражение (12-7) преобразуется в следующее:

$$P_1=K\lambda D_{н1}^{3+\gamma'}. \qquad (12\text{-}13)$$

Здесь отношение λ соответствует одной из порядковых длин сердечника, т. е. первой, второй, n-й. При построении серии целесообразно брать за основу наибольшую из длин, оценив для нее предварительно наибольшее допустимое отношение λ. При этом остальные длины сердечника определяются с учетом (12-9) из выражения

$$\lambda_2/\lambda_1=\lambda_3/\lambda_2—\lambda_n/\lambda_{n-1}=k_{н.м1}, \qquad (12\text{-}14)$$

где λ_1, λ_2, λ_3, λ_{n-1}, λ_n — отношения λ для первой, второй, третьей, $(n-1)$-й и n-й порядковых длин сердечника.

Из (12-13) при известных значениях $D_{н1}$, γ' и K определятся соответствующие мощности P_1, а при помощи рис. 5-1—5-3 — мощности P_2, и наоборот, при заданных значениях мощностей P_2 (а следовательно, и мощностей P_1) определятся соответствующие диаметры $D_{н1}$ из выражения

$$D_{н1}=(P_1/K\lambda)^{1/(3+\gamma')}. \qquad (12\text{-}15)$$

Для установления рациональной структуры участков или всей серии двигателей, у которых отношение λ изменяется с ростом диаметра $D_{н1}$ (двигатели постоянного тока, высоковольтные асинхронные двигатели, низковольтные асинхронные двигатели со степенью защиты IP44 и высотами оси вращения свыше 250 мм и др.), следует пользоваться (12-7), (12-8). Значения K, $k_{н.д}$, γ' могут быть определены по результатам расчетов граничных машин рассматриваемого участка серии.

При разработке современных серий электродвигателей обычно приходится иметь дело с заданными стандартными рядами мощностей и высот оси вращения, а следовательно, и диаметров $D_{н1}$. В этом случае для определения структуры будущей серии требуется только установить наиболее целесообразную привязку мощностей к высотам оси вращения (диаметрам $D_{н1}$) при рациональных отношениях λ для наибольших порядковых длин, пользуясь выражением (12-7) или (12-13).

Привязку мощностей к высотам оси вращения следует установить отдельно для всех входящих в серию чисел полюсов или частот вращения, задаваясь соответствующими значениями коэффициента K, учитывающими перспективный уровень использования активной части машин (см. гл. 11).

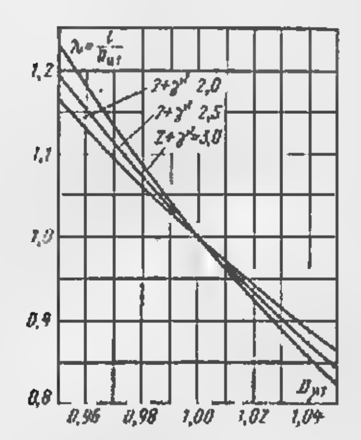


Рис. 12-4. Зависимость $\lambda = f(D_{н1})$ асинхронных двигателей при различных значениях показателя степени $2+\gamma'$.

Установив привязку мощностей к высотам оси вращения, можно, пользуясь рис. 5-1—5-3 и выражениями (11-18) и (11-19), легко определить конкретные длины сердечников всех двигателей серии.

Таким образом может быть найдена наиболее рациональная структура проектируемой серии двигателей со степенью защиты IP44 и предварительно установлен объем их активной части как исходные данные для дальнейших расчетно-конструкторских работ.

Серия двигателей исполнения IP23, базирующаяся обычно на тех же высотах оси вращения и наружных диаметрах, что и серия двигателей исполнения IP44, может быть построена аналогичным образом. Отношения λ и соответствующие длины сердечников могут быть найдены из выражений (12-7), (11-20) или (11-21), но при значениях K и γ', соответствующих двигателям этого исполнения.

С помощью выражения (12-7) можно определить влияние уменьшения или увеличения диаметра $D_{н1}$ на отношение λ при неизменной мощности двигателя. Для этого выражение (12-7) может быть преобразовано в следующее:

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{(l/D_{н1})'}{l/D_{н1}} = \left(\frac{D_{н1}}{D'_{н1}}\right)^{2+\gamma'}, \tag{12-16}$$

где отношение λ' соответствует диаметру $D'_{н1}$.

На рис. 12-4 показана зависимость отношения λ от диаметра $D_{н1}$ в относительных единицах для значений показателя степени $2+\gamma'$ от 2,0 до 3,0, т. е. находящихся в диапазоне значений, присущих современным сериям асинхронных двигателей. Из рис. 12-4 видно, что даже при сравнительно незначительных изменениях диаметра $D_{н1}$ (около $\pm 5\%$) отношение λ изменяется весьма существенно. Так, для среднего значения $2+\gamma'=2{,}5$ оно изменяется при этих условиях соответственно на $-15{,}8$ и $+19{,}4\%$.

Эта взаимосвязь между изменениями отношения λ и диаметра $D_{н1}$ показывает, какое важное значение для улучшения технологичности двигателей серии имеет отыскание конструктивно-технологической и эксплуатационной возможности максимального увеличения диаметров $D_{н1}$ при данных значениях мощности P_2 и данных нормализованных высотах оси вращения h.

Очень важна роль отношения λ в структуре серии асинхронных двигателей при переходе от одного числа полюсов к другому при данном диаметре $D_{н1}$. Идеальной серией была бы такая, у которой указанный переход не изменял бы отношения λ. Это обеспечило бы полную унификацию длин сердечников данного диаметра для всех чисел полюсов.

При условии λ=const воспользуемся (12-7). Обозначим индексами p и $p+1$ исходное и соседнее бо́льшее число пар полюсов, тогда будет иметь место отношение

$$\frac{\lambda_{p+1}}{\lambda_p}=\frac{K_p}{K_{p+1}k^m_{н.мір}}, \qquad (12\text{-}17)$$

где $k_{н.мір}$ — коэффициент нарастания (убывания) подводимой мощности при переходе с одного числа полюсов на другое (средний для данного отрезка серии); m — шаг перехода по числу ступеней шкалы мощностей.

Из (12-17) следует, что для осуществления наиболее рациональной унификации длин сердечников двигателей соседних чисел пар полюсов (при $\lambda_{p+1}/\lambda_p=1$) должно быть выдержано условие

$$k^m_{н.мір}=K_p/K_{p+1}. \qquad (12\text{-}18)$$

Однако на практике при наличии стандартной шкалы мощностей и определенного уровня энергетических показателей это условие является обычно неосуществимым или же осуществимым только в отдельных частных случаях; поэтому при разработке серий электродвигателей приходится выбирать унифицированные длины сердечников машин соседних чисел полюсов лишь в тех случаях, когда они по первым расчетным данным оказываются достаточно близкими. При этом за основу унификации принимают наибольшую длину сердечника, пренебрегая получающимся некоторым недоиспользованием машин, имеющих меньшую расчетную длину.

Все сказанное относится в равной мере и к двигателям постоянного тока, с той лишь разницей, что в (12-17) и (12-18) индексы p и $p+1$ заменяются соответствующими соседними частотами вращения.

У асинхронных двигателей изменение длин сердечников при переходе от одного числа полюсов к другому оказывает основное влияние на выбор длины станины. Для унификации элементов конструкции двигателей и сохранения одних и тех же установочных размеров для всех чисел полюсов целесообразно для каждой порядковой длины сердечника при данном диаметре $D_{н1}$ иметь одинаковые по длине станины. Проведению такой унификации способствует то, что увеличению длины сердечника по мере перехода от меньшего числа полюсов к большему соответствует определенное укорочение вылетов лобовых частей обмотки статора. В идеале нарастание длин сердечников должно компенсироваться суммарным уменьшением двусторонних вылетов лобовых частей. Тогда станина для данной порядковой длины сердечника будет одинаковой по длине для всех чисел полюсов. Следовательно, останется одной и той же и глубина подшипниковых щитов.

В качестве примера можно привести современную отечественную серию электродвигателей А2 АК2 мощностью от 200 до 1000 кВт на напряжение 6000 В. В этой серии предусмотрены двигатели на все числа полюсов от 4 до 12. И для каждой порядковой длины сердечника при каждом диаметре $D_{н1}$ имеется только по одной станине, в которой раз-

мещаются соответствующие сердечники всех чисел полюсов, охватываемые серией. Ниже приведены нарастания вторых порядковых длин сердечников (с учетом наличия радиальных вентиляционных каналов) при $D_{н1}$=850 мм и соответствующие уменьшения двусторонних вылетов лобовых частей обмотки статора:

$2p$	4	6	8	10	12	Сумма
Нарастание длины сердечника, мм	0	60	50	20	30	150
Уменьшение двусторонних вылетов лобовых частей обмотки статора, мм	0	82	48	32	24	186

По этим данным при конструировании двигателей оказалось возможным легко выбрать наиболее целесообразную длину унифицированной станины. Такая же примерно картина имеет место и для первых порядковых длин сердечников данного диаметра $D_{н1}$. Аналогичные соотношения были использованы при выборе длины станины двигателей и остальных диаметров $D_{н1}$ серии. В тех случаях, когда нарастание длины сердечника почему-либо существенно превышает возможное уменьшение двусторонних вылетов лобовых частей обмотки статора, приходится в структуре серии применять снижение мощности при переходе с какого-либо числа полюсов к соседнему бóльшему не на одну ступень шкалы мощностей, а на две, принимая в (12-17) и (12-18) $m=2$.

Глава тринадцатая

ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА СЕРИЙ НА ЭВМ

13-1. ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТОВ НА ЭВМ

При проектировании серии электродвигателей с широким диапазоном мощностей, когда приходится выполнять расчеты большого количества двигателей по одной и той же методике, весьма целесообразным является применение ЭВМ [Л. 2], так как в этом случае оказывается вполне оправданной затрата относительно большого времени на программирование. Как указано в [Л. 27], на поверочный расчет асинхронного двигателя на ЭВМ затрачивается около 7,5 с. При этом непосредственно на расчет тратится только 1,5 с, а остальное время уходит на ввод в машину исходных данных и печать результатов расчета. Обычный поверочный расчет двигателя выполняется на ЭВМ примерно в 3000 раз быстрее, чем при ручном счете у опытного расчетного персонала. Кроме того, а это является наиболее важным, применение ЭВМ, способной за короткий промежуток времени выполнять большое количество сложных расчетов, дает возможность находить для проектируемых двигателей серии оптимальные варианты выполнения по соотношению электромагнитных нагрузок и размеров, обеспечивающие наименьшие суммарные затраты на материалы, изготовление и эксплуатацию. А это,

в свою очередь, обеспечивает при внедрении спроектированной серии большую экономию средств в народном хозяйстве.

Выбор оптимального варианта можно было бы осуществлять путем последовательного приближения, чередуя расчеты на ЭВМ с «ручной» их корректировкой при анализе промежуточных результатов. Однако такой путь был бы очень длителен, так как много времени пришлось бы расходовать на ввод в ЭВМ большого количества исходных данных и на печать результатов расчета каждого из промежуточных вариантов. Гораздо целесообразнее и эффективнее со всех точек зрения применение современного расчета-поиска, при котором машина совершает автоматический переход от одного рассчитанного варианта к другому, сравнивая между собой полученные результаты расчета по вполне определенным, заранее заданным критериям, с отбором наиболее целесообразных. При этом машина сама определяет направление дальнейшего движения в поиске оптимального варианта и совершает последующий шаг, используя информацию, полученную на предыдущих шагах. Такой метод поиска оптимального варианта известен как случайный поиск с самообучением [Л. 10].

В памяти ЭВМ сохраняются результаты нескольких предыдущих шагов поиска и по этим данным прогнозируется наивыгоднейшее направление очередного перемещения.

В процессе поиска оптимального варианта вычислительной машине приходится оперировать большим числом независимых переменных при учете ряда ограничений («лимитёров»), обусловленных требованиями производства и эксплуатации. К производственным ограничениям относятся накладываемые конструкцией и технологией ограничения на некоторые размеры активной части; к ограничениям по условиям эксплуатации (например, для асинхронных двигателей) — ограничения на значения пусковых тока и момента, максимального момента, превышения температуры частей машины, скорости нарастания температуры обмотки при заторможенном роторе.

Применение метода случайного поиска с самообучением дает возможность находить в этих условиях правильное решение в сравнительно короткий промежуток времени.

В методике расчетов на ЭВМ помимо критерия оптимизации по сумме затрат на материалы, изготовление и эксплуатацию двигателя в течение расчетного срока службы могут быть предусмотрены и другие критерии оптимизации, как, например, по минимуму стоимости двигателя, по минимуму эксплуатационных расходов, минимуму массы двигателя, минимуму длины активной части, минимуму расхода меди, максимально допустимой продолжительности включения, максимуму к. п. д. или коэффициента мощности при номинальной или частичной нагрузке, минимуму первичного тока, максимуму пускового или максимального момента, минимуму пускового тока, минимуму скорости нарастания температуры обмотки и т. д. Может быть предусмотрен также поиск оптимального варианта двигателя по критерию, являющемуся линейной комбинацией из двух любых вышеуказанных критериев.

При расчете двигателей серии 4А в качестве второго критерия была принята минимальная длина сердечника статора как показатель наибольшей технологичности конструкции.

К перечисленным ограничениям по условиям эксплуатации могут быть добавлены ограничения по к. п. д. и коэффициенту мощности при номинальной и при частичных нагрузках, по нагреву ротора при пуске и ряд других.

После окончания поиска оптимального варианта по заданному критерию оптимальности с соблюдением в этом варианте всех необходимых требований к основным характеристикам и прочим параметрам двигателя ЭВМ выдает результаты расчета в виде заполненного бланка с указанием элементов расчета и с условными буквенными обозначениями всех выдаваемых параметров. Эти данные являются основой для разработки конструкции двигателя.

13-2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НА ЭВМ

Ход расчета на ЭВМ аналогичен ходу «ручного» расчета. Однако все применяемые зависимости должны быть заданы в аналитической или цифровой табличной форме. Целесообразно применение аппроксимации для функций, задаваемых кривыми (например, кривые намагничивания). Целесообразно также при расчетах групп электродвигателей большого диапазона мощностей и частот вращения, особенно если объем памяти ЭВМ сравнительно невелик, применять в формуляре расчета относительную систему единиц, что дает возможность сузить на несколько порядков пределы изменения параметров рассчитываемых двигателей.

При поиске оптимального варианта исходные данные подразделяются на постоянные (неизменные в течение всего расчета), переменные (изменяемые машиной при переходе от одного варианта к другому) и лимитеры.

Варианты расчета, не удовлетворяющие хотя бы одному из лимитирующих показателей, исключаются машиной как неприемлемые.

Остальные варианты подвергаются оценке на степень оптимальности. Критерием оптимальности при проектировании серий электродвигателей общего применения с массовым выпуском является обычно требование наибольшей их экономичности в народном хозяйстве, т. е. наименьшей суммы затрат (см. гл. 8).

Поиск оптимального варианта выполняется ЭВМ, как указывалось выше, методом случайного поиска с самообучением, т. е. с автоматическим прогнозированием наивыгоднейшего направления очередного перемещения. Наличие ограничений существенно затрудняет решение задачи. Движение в области, где все поставленные ограничения удовлетворяются (в допустимой области), сводится к минимизации критерия оптимальности по соответствующему поисковому алгоритму. Обычно применяемые поисковые методы являются методами приближенного определения экстремума, при которых вследствие погрешностей вычисления критерия оптимальности и ограничений в отдельных неблагоприятных случаях возможно появление ошибки в определении экстремума, значительно превышающей допустимую. Для уменьшения этой ошибки применяются методы решения так называемой «овражной» задачи. Ошибку можно уменьшить также путем минимизации вместо критерия оптимальности некоторых варьируемых параметров двигателя, например длины сердечника l, в результате чего из-за погрешности определения минимальной стоимости и малых значений dC/dl удается уменьшить длину l, сохранив стоимость C практически минимальной.

При расчете двигателей массового выпуска определенное влияние на выбор оптимальных вариантов оказывает необходимость унификации размеров штампов листов сердечников статора и ротора асинхронных двигателей одной и той же высоты оси вращения, но разных длин, или дополнительно еще и двух соседних чисел полюсов (например, шести- и

восьмиполюсных); унификации длин сердечников двигателей различных чисел полюсов при данных высоте оси вращения и длине корпуса. В таких случаях поиск оптимума обычно производят на «базовом» типе двигателя, который является наиболее массовым в производстве или же для которого рациональный выбор унифицируемых размеров оказывает наибольшее влияние на уровень эксплуатационных показателей. Для остальных двигателей данной высоты оси вращения выбор оптимальных вариантов производят при заданном значении унифицируемого размера, установленном при выборе оптимального варианта у «базового» типа двигателя.

Параметры, имеющие одинаковые значения для большой группы рассчитываемых двигателей: число фаз, частота тока, напряжение, коэффициенты заполнения сердечников статора и ротора сталью, удельные потери в стали, удельное сопротивление материала обмотки и т. д. — входят непосредственно в расчетные формулы в числовом виде.

Такую группу параметров (например: сечение короткозамыкающего кольца ротора асинхронных двигателей, диаметр вентилятора в обдуваемых двигателях и др.) вводят в расчетный формуляр в виде простых алгебраических зависимостей от основных размеров двигателя. Это резко сокращает число параметров, задаваемых перед началом расчета, и уменьшает время ввода исходных данных.

В качестве примера для асинхронных двигателей могут быть приняты следующие исходные данные.

1. Заданные параметры, постоянные в течение всего расчета-поиска: номинальная мощность P_2, кВт; номинальное фазное напряжение U_1, В; частота f_1, Гц; число полюсов $2p$; число пазов статора и ротора Z_1, Z_2; воздушный зазор δ, мм; шаг обмотки статора y_1; число слоев обмотки; число параллельных ветвей в фазе a_1; скос пазов ротора $\beta_{ск}$; коэффициент заполнения сердечника сталью k_c; внутренний диаметр сердечника ротора D_2, мм; диаметр и число аксиальных каналов ротора $d_{к2}$, мм, $n_{к2}$; толщина пазовой изоляции $b_и$, мм; удельная проводимость обмотки статора и ротора при расчетной температуре γ_θ, м/(Ом·мм²), удельные потери в стали $p_{1,0/50}$, Вт/кг; кривые намагничивания для зубцов и спинки $H=f(B)$ в табличной форме; зазор между лобовыми частями катушек обмотки с жесткими секциями и длина прямолинейного вылета, мм; двусторонняя толщина изоляции обмоточного провода, мм; коэффициент заполнения паза $k_п$; плотность материала обмотки статора и ротора γ, г/см³; коэффициент загрузки для расчета стоимости потерь; коэффициент теплопроводности материалов; цены материалов; параметры для вычисления затрат в эксплуатации; размеры элементов пазов статора и ротора, которые в процессе расчета остаются неизменными: шлицевой части, радиусов закруглений, углов наклона клиновой части и т. п.; а также ряд прочих неизменных параметров и вспомогательных данных.

2. Заданные параметры, варьируемые в течение расчета-поиска: наружный диаметр сердечника статора $D_{н1}$, мм; внутренний диаметр сердечника статора D_1, мм; длина сердечника l, мм; варьируемые размеры пазов статора и ротора $h_п$, $b_п$, мм; число витков w_1 и прочие, зависящие от них параметры; максимальная индукция в воздушном зазоре B_δ, Т; диаметр вентилятора $d_в$, мм; сечение короткозамыкающих колец $q_к$, мм²; длина лобовой части обмотки статора $l_л$, мм, и др.

Следует отметить, что наружный диаметр сердечника статора $D_{н1}$ входит в число варьируемых данных только для общего случая поиско-

вых расчетов (при расчете «базовых» двигателей), когда перед началом разработки серии требуется установить наивыгоднейшие для данного ряда мощностей значения наружного диаметра $D_{н1}$. Полученные расчетные значения $D_{н1}$ увязываются затем со стандартными высотами оси вращения двигателей и корректируются с учетом конструкторско-технологических требований. Образовавшийся таким образом геометрический ряд диаметров $D_{н1}$ кладется в основу дальнейшего проектирования серии. В связи с этим диаметр $D_{н1}$ переходит из группы варьируемых в группу постоянных исходных данных.

При расчете двигателей серии 4А в качестве «базовых» были приняты четырехполюсные двигатели второй длины. Для них число варьируемых параметров было максимальным.

Двигатели второй длины и других чисел полюсов рассчитывались уже при заданном наружном диаметре $D_{н1}$.

Для всех двигателей первой длины принимались поперечные размеры сердечников, определенные для соответствующих по числу полюсов двигателей второй длины. Число варьируемых параметров для двигателей первой длины — минимально.

3. В число лимитеров входят следующие параметры:
превышение температуры обмотки статора $\Delta\theta_{м1}$, °С; кратность максимального момента $K_м$; кратность начального пускового момента $K_п$; кратность начального пускового тока K_I, скорость нарастания температуры обмотки статора при заторможенном роторе T, °С.

К числу конструкционно-технологических ограничений относятся следующие:

ширина зубцов статора $b_{з1}$ и ротора $b_{з2}$ в наиболее узком месте не должна быть менее $1+0{,}01D_{н1}$, мм; высота спинки статора h_{c1} не должна быть менее $0{,}055\ D_{н1}$, мм; полная высота паза ротора $h_{п2}$ должна удовлетворять условию:

при отсутствии аксиальных каналов

$$D_1/2-\delta-h_{п2}-D_2/2\geqslant 0{,}03\,D_{н1};$$

при наличии аксиальных каналов

$$D_1/2-\delta-h_{п2}-D_2/2-d_{к2}\geqslant 0{,}03\ D_{н1}.$$

В оптимальном варианте двигателя, полученном по критерию минимума суммы затрат, все размеры его активной части и значения его энергетических показателей являются оптимальными, поэтому уровень его к. п. д. и коэффициента мощности не задается в этом случае заранее и не включается в число лимитеров, а определяется автоматически в ходе поиска оптимального варианта. Определяемый таким образом уровень энергетических показателей обычно не отличается существенно от их среднего мирового уровня.

13-3. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЭВМ

Запрограммированные для ЭВМ расчетно-поисковые методики с различными критериями оптимизации, ограничениями и с наличием возможности выбора разных независимых переменных позволяют проводить исследования ряда вопросов проектирования серий электродвигателей. Сюда относится, например, определение влияния отступлений от оптимальных наружных диаметров сердечника на суммарные затраты; влияния на энергетические характеристики и суммарные затраты

класса нагревостойкости изоляции с использованием ее по нагреву; влияния расчетного срока службы и расчетного коэффициента загрузки на технико-экономические показатели двигателей.

Подробные сведения о проведении этих и ряда других исследований, выполненных с помощью ЭВМ, изложены в [Л. 27].

Ниже приводятся краткие результаты исследования перечисленных выше вопросов, наглядно демонстрирующие широту возможностей работы с ЭВМ.

Влияние отклонений от оптимальных значений наружных диаметров сердечника статора на ±20% на сумму затрат исследовалось на асинхронных двигателях с диапазоном мощностей 1,5—30 кВт В результате исследований установлено, что увеличение суммы затрат относительно оптимального значения, о. е.

$$\Delta C=2(\Delta D_{н})^2, \qquad (13\text{-}1)$$

где $\Delta D_{н}$ — отклонение наружного диаметра сердечника от оптимального значения, о. е.

Отклонения $D_{н}$ от оптимальных значений бывают необходимы при увязке диаметров сердечников с нормализованными высотами оси вращения. Формула (13-1) позволяет установить допускаемую при этом степень отклонения суммарных затрат от минимума.

Влияние класса нагревостойкости изоляции на энергетические характеристики и суммарные затраты исследовалось на асинхронных двигателях с высотами оси вращения 180—250 мм и степенью защиты IP23. Были выполнены поисковые расчеты оптимальных двигателей с изоляцией классов нагревостойкости E и F. За предельно допускаемые превышения температуры обмотки статора принимались соответственно температуры 68 и 90°С, т. е. был предусмотрен 10%-ный производственный запас. Расчетная температура обмоток для определения потерь была принята равной соответственно 75 и 115°С согласно ГОСТ 183-74. Было учтено, что провода класса F примерно на 16% дороже проводов класса E.

Расчеты показали, что переход с изоляции класса нагревостойкости E на изоляцию класса F позволяет уменьшить расход меди в среднем на 15%, электротехнической стали — на 18%; стоимость двигателей снижается в среднем на 12%; суммарные затраты уменьшаются на 2,8%. При этом к. п. д. при номинальной нагрузке понижается в среднем на 1,5%, а при среднестатистическом коэффициенте загрузки 0,6 на 0,6%, что и обусловливает сравнительно небольшое увеличение эксплуатационных расходов. Коэффициент мощности при номинальной нагрузке сохраняется неизменным, а при коэффициенте загрузки 0,6 увеличивается в среднем на 0,007.

Таким образом, данное исследование показывает, что применение изоляции повышенного класса нагревостойкости в двигателях указанного выше участка высот оси вращения является экономически целесообразным.

Влияние расчетного срока службы на технико-экономические показатели было исследовано на асинхронных двигателях мощностью до 15 кВт. В соответствии со статистическими данными средний срок службы этих двигателей до первого капитального ремонта составляет 5 лет и совпадает со средним сроком окупаемости, определенным по основным отраслям народного хозяйства, использующим асинхронные двигатели. Этот срок службы и кладется в основу расчетов затрат в эксплуатации при поиске оптимальных вариантов. Однако при проектировании новых

серий двигателей обычно предусматривается увеличение их среднего срока службы. В связи с этим важно выяснить, существенным ли будет различие в технико-экономических показателях двигателей, рассчитанных на разные сроки службы.

Поисковые расчеты были выполнены на четырехполюсных двигателях мощностью 3 и 15 кВт с изоляцией классов нагревостойкости E и F, а также без ограничения превышения температуры. Расчеты оптимальных вариантов показывают, что при изменении срока службы в интервале от 4 до 8 лет расход активных материалов увеличивается незначительно. Расход материалов при превышении температуры по классу F и без ограничения превышения практически один и тот же, а при превышении температуры по классу E он выше. В связи с этим несущественно изменяется и стоимость двигателя. Изменение к. п. д. и коэффициента мощности также мало. Таким образом, можно считать, что изменение срока службы двигателей мощностью до 15 кВт в интервале от 4 до 8 лет не оказывает заметного влияния на их основные технико-экономические показатели.

Влияние расчетного коэффициента загрузки на технико-экономические показатели двигателей было исследовано на четырехполюсных асинхронных двигателях мощностью 3 и 15 кВт с изоляцией классов нагревостойкости E и F. Поисковые расчеты были выполнены для коэффициентов загрузки 0,4; 0,6; 0,8 и 1. Из расчетов следует, что при изоляции классов E и F расход активных материалов для двигателей мощностью 3 кВт практически не зависит от коэффициента загрузки; для двигателя мощностью 15 кВт с изоляцией класса E при изменении коэффициента загрузки от 0,4 до 1 расход электротехнической стали возрастает на 7%, а меди — на 10%. У этого же двигателя с изоляцией класса F при том же диапазоне изменения коэффициента загрузки расход электротехнической стали возрастает уже на 45%, а меди — на 22%. Это приводит к соответствующему увеличению стоимости.

Коэффициент полезного действия, определённый для всех рассчитанных двигателей при коэффициенте загрузки 0,6, сравнительно мало изменяется при переходе к другим значениям коэффициента загрузки от 0,4 до 1 (от 0,1 до 0,5%), к. п. д. при номинальной нагрузке у двигателей с изоляцией класса E изменяется сравнительно мало (на 0,2—1,02%), а у двигателей с изоляцией класса F — более значительно (на 1,5—3,0%). Коэффициент мощности двигателей с ростом коэффициента загрузки во всех случаях уменьшается.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что для двигателей мощностью до 15 кВт влияние коэффициента загрузки на технико-экономические показатели при изоляции класса нагревостойкости E незначительно, а при изоляции класса F — более существенно. Это указывает на необходимость более точного определения среднестатистических коэффициентов загрузки для двигателей, относящихся к старшим участкам серий.

Из приведенных примеров видно, насколько широко и с каким эффектом могут быть использованы возможности, предоставляемые ЭВМ специалистам — разработчикам серий электродвигателей. Это в равной степени относится и к другим видам электрических машин, в том числе к сериям двигателей постоянного тока.

13-4. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭВМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИИ

В последние годы в ряде зарубежных стран (США, ФРГ, Франции, Великобритании, Швейцарии, Норвегии, ЧССР и др.) наблюдается интенсивное применение ЭВМ для автоматизированного проектирования конструкций машин, аппаратов и других устройств. Разработка конструкции ведется с применением специальных систем, включающих в себя дигитализаторы, дисплеи с электронными рейсфедерами и быстродействующие вычерчивающие устройства. Работа выполняется в процессе диалога человек — машина и заканчивается выдачей рабочих чертежей и их размножением. С помощью таких устройств предполагается осуществить выполнение автоматизированного проектирования электродвигателей, включающего в себя не только уже внедренное автоматическое определение оптимальных размеров и параметров активной части, расчеты вентиляционные и тепловые, но также и расчеты механические с установлением оптимальных размеров вала, подшипников и т. д., разработкой конструкции всех узлов и деталей машины и расчетом их массы, решением вопросов вибрации, шума, оптимальных показателей надежности и выдачей размноженных рабочих чертежей.

Создание такой системы автоматизированного проектирования серий электродвигателей существенно снизит трудоемкость и длительность проектных работ и значительно повысит их эффективность.

Часть вторая

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Глава четырнадцатая

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОСНОВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СЕРИИ

14-1. СЕРДЕЧНИКИ СТАТОРА И РОТОРА

Листы сердечника штампуют из электротехнической стали толщиной 0,5 мм (в зарубежной и частично в отечественной практике для машин небольшой мощности применяют в ряде случаев сталь толщиной 0,65 мм) и изолируют друг от друга либо оксидированием (для двигателей с высотами оси вращения примерно до 250 мм), либо лакировкой (для двигателей с бо́льшими высотами оси вращения), или же используют сталь, выпускаемую с электроизоляционным покрытием (см. табл. 14-1).

Для размещения обмотки листы сердечника статора штампуют с полузакрытыми, полуоткрытыми или открытыми пазами.

При полузакрытых пазах обмотку выполняют всыпной из проводов круглого поперечного сечения, при этом коэффициент заполнения пазов медью сравнительно невысок; однако размеры полузакрытых пазов могут быть выбраны таким образом, чтобы зубец на протяжении большей части высоты был равновеликого поперечного сечения. Следовательно, при полузакрытой форме пазов магнитная индукция одинакова по высоте зубца. Наиболее широко применяют трапецеидальную форму полузакрытых пазов.

При полуоткрытых и открытых пазах обмотку выполняют из проводов прямоугольного поперечного сечения, в результате чего повышается коэффициент заполнения пазов медью. Однако при прямоугольных пазах зубцы имеют трапецеидальную форму с неравномерной магнитной индукцией по высоте. Узкая часть зубца (у открытия паза) в магнитном отношении загружена значительно больше, чем широкая.

Для размещения короткозамкнутой обмотки листы сердечника ротора штампуют с закрытыми, полузакрытыми и открытыми пазами (при $h \geqslant 100$ мм).

Двигатели с фазным ротором при высотах оси вращения 280 мм и более относятся к основному исполнению серии. Для размещения обмотки листы сердечника ротора таких двигателей штампуют с полузакрытыми пазами.

Для изготовления сердечников статора и ротора наиболее прогрессивным является применение холоднокатаной изотропной электротехнической стали (табл. 14-1).

Для двигателей со слабо насыщенной магнитной системой (обычно с $h \geqslant 160$ мм) может также применяться холоднокатаная сталь марки 2211, имеющая такие же удельные потери, как сталь марки 2013, но несколько пониженную магнитную проницаемость (магнитная индукция при напряженности магнитного поля 25 А/см составляет 1,56 Т вме-

сто 1,65 Т у стали марки 2013). Достоинством стали марки 2211 является то, что она может штамповаться в термически обработанном состоянии и иметь электроизоляционное покрытие; k_c для этой стали также равен 0,97. Применение стали марки 2211 с электроизоляционным покрытием целесообразно при малых количествах изготовляемых двигателей, так как при этом отпадает надобность в сложных и дорогих печах для термической обработки и в оборудовании для электроизоляционного покрытия листов.

Таблица 14-1

Рекомендуемые марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали, способы изолировки листов и коэффициент заполнения сталью k_c сердечников статора и ротора асинхронных двигателей

h, мм	U, В	Марка стали	Статор		Короткозамкнутый ротор		Фазный ротор	
			Способ изолировки листов	k_c	Способ изолировки листов	k_c	Способ изолировки листов	k_c
50—250	≤660	2013	Оксидирование	0,97	Оксидирование	0,97	—	—
280—355	≤660	2312	Лакировка	0,95	Оксидная пленка	0,97	Лакировка	0,95
400—560	6000	2411	Лакировка	0,95	Лакировка	0,95	Лакировка	0,95

Таблица 14-2

Рекомендуемые числа пазов статора и ротора

h, мм	Z_1/Z_2 при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
	Двигатели с короткозамкнутым ротором					
50—63	24/19	24/18	36/28	—	—	—
71	24/19	24/18	36/28	36/28	—	—
80—100	24/19	36/28	36/28	36/28	—	—
112—132	24/19	36/31	54/51	48/44	—	—
160	36/28	48/38	54/51	48/44	—	—
180—200	36/28	48/38	72/58	72/58	—	—
225	36/28	48/38	72/56	72/56	—	—
250	48/40	60/50	72/56	72/56	—	—
280—355	48/38	60/70	72/82	72/86	90/106	90/106
400—560	—	60/70	72/84	72/86	90/106	90/106
	Двигатели с фазным ротором					
280—355	—	60/72	72/81	72/84	90/120	90/108
400—560	—	60/72	72/90	72/96	90/120	90/126

Принимаемые для статора и ротора числа пазов зависят от чисел полюсов и от диаметра сердечника. Выбор сочетания чисел пазов статора и короткозамкнутого ротора должен определяться минимальными добавочными потерями, устранением провалов в характеристике пускового момента и уменьшением шума и вибрации двигателя. Приведенные в табл. 14-2 сочетания чисел пазов Z_1/Z_2 установлены практикой и проверены многочисленными испытаниями серийных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

Для снижения уровней шума и вибрации, улучшения пусковых характеристик двигатели с высотами оси вращения до 160 мм включительно имеют скос пазов короткозамкнутого ротора на одно зубцовое деление статора; двигатели с высотами оси вращения свыше 160 мм обычно выполняют без скоса пазов.

Размеры пазов статора и ротора в листе (размеры в штампе) отличаются от размеров пазов в собранном сердечнике (размеры в свету), так как при сборке сердечника возможно некоторое смещение листов относительно друг друга, поэтому при определении необходимых размеров паза в штампе учитывают припуски на сборку сердечника, указанные в табл. 14-3.

Таблица 14-3

Припуски на сборку сердечников статора и ротора при штамповке компаундным штампом

h, мм	Припуски, мм	
	по ширине паза b_c	по высоте паза h_c
50—132	0,1	0,1
160—250	0,2	0,2
280—355	0,3	0,3
400—560	0,4	0,3

Сердечник ротора насаживают непосредственно на вал.

В сердечниках роторов двигателей с высотами оси вращения $h \geqslant 250$ мм предусматривают один ряд аксиальных круглых вентиляционных каналов для улучшения охлаждения двигателей, снижения их массы, уменьшения махового момента ротора.

Двигатели исполнения IP23, а также исполнения IP44 со способом охлаждения IC0151 при длине сердечника свыше 300 мм имеют в статоре и роторе радиальные вентиляционные каналы. В этом случае аксиальные вентиляционные каналы в сердечнике ротора служат для подвода охлаждающего воздуха к радиальным вентиляционным каналам.

14-2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАГНИТОПРОВОДА

а) Основные размеры

В § 12-6 даны общие сведения по определению структуры проектируемой серии, т. е. по выбору наиболее рациональной взаимной увязки между стандартными рядами мощностей и высот оси вращения при данных числах полюсов, приведены необходимые для этого формулы, базирующиеся на коэффициенте K, показателе степени $2+\gamma'$ и отношении λ, значения которых предполагаются известными.

Здесь излагается способ определения основных размеров двигателей, которые являются опорными точками будущей серии и располагаются либо в начале, либо в конце соответствующего ее участка. При наличии результатов подробных расчетов указанных двигателей могут быть найдены по методу, изложенному в § 11-2, значения K, $2+\gamma'$ и λ, характерные для данного участка серии. С помощью этих значений можно определить основные размеры сердечников всех промежуточных двигателей участка.

Расчет двигателей, являющихся опорными точками данного участка, а также расчет всех прочих двигателей серии выполняется обычно на ЭВМ с поиском оптимальных вариантов по критерию минимума суммы затрат. Такое проведение расчетов доступно, конечно, только специальным проектирующим организациям, обладающим ЭВМ и располагающим соответствующим квалифицированным персоналом. При отсутствии ЭВМ выполняется «ручной» счет, методика которого приводится ниже. Предполагается, что результаты «ручного» счета будут находиться примерно в районе оптимума или очень близко от него, поскольку этот оптимум характеризуется достаточно пологими U-образными кривыми, а задаваемые в приводимой ниже методике предельные электромагнитные нагрузки рассчитываемых двигателей представляют собою статистические средние значения нагрузок двигателей, рассчитанных на ЭВМ с поиском оптимальных вариантов (при $h\leq 250$ мм) или же «вручную» с отработкой наилучших вариантов по энергетическим и массо габаритным показателям (при $h\geq 280$ мм).

Серия двигателей обычно проектируется с двумя длинами сердечника на одном диаметре. Выбрав из шкалы мощностей, принятой для данного участка серии, две соседние мощности (которые можно именовать отрезком серии), определяют для каждой из них подводимую мощность, В·А:

$$P_1=P_2/\eta\cos\varphi, \tag{14-1}$$

значения η и $\cos\varphi$ принимают по рис. 5-1 и 5-2 в зависимости от исполнения двигателей по степени защиты, числа полюсов и мощности P_2.

Задаются стандартной высотой оси вращения h из приложения 3. При этом в качестве начального этапа целесообразно использовать данные табл. 2-1—2-5, характеризующие современную увязку мощностей с высотами оси вращения двигателей.

По рис. 11-2 или по формуле (11-4) определяют соответствующие выбранной высоте оси вращения h значения h_2 и $D_{н1}$. Полученное значение $D_{н1}$ округляют до целых значений.

В табл. 14-4 и 14-5 приведены для примера наибольшие значения диаметров $D_{н1}$, допустимые для данных высот оси вращения, подсчитанные по (11-4) с показателем степени 0,3 для двигателей с литыми станинами (при $h\leq 250$ мм) и —0,34 для двигателей со сварными станинами (при $h\geq 280$ мм) *.

В табл. 14-4 показана ширина резаных лент электротехнической стали $b_{р.л}$, из которых наиболее рациональна вырубка листов сердечников указанных диаметров. Отрицательный припуск — $\Delta_{шт}$ соответствует применяемой в зарубежной практике штамповке с «лысками», т. е. сегментными срезами по внешнему контуру вырубки. Поскольку эти срезы оказывают отрицательное влияние на нагрев двигателей (площадь теплового контакта между сердечником и станиной уменьшается) и на ток холостого хода (индукция в спинке повышается), то глубина срезов должна быть ограниченной. Установлено, что при наличии на вырубке четырех срезов одинаковой глубины ширина ленты может быть принята примерно на 1% меньше вырубаемого диаметра $D_{н1}$. При этом можно ожидать повышения нагрева двигателей примерно на 8% и увеличения тока холостого хода на 5%. Метод штамповки с отрицательным припуском дает возможность получать экономию электротехнической стали до

* Формулу (11-4) с показателем степени 0,34 можно применять и для двигателей с высотами оси вращения $h\leq 250$ мм, имеющих сварные станины.

10% по сравнению с методом штамповки с положительным припуском. Штамповка может быть также двухрядной с шахматным раскроем, что обеспечивает примерно такую же экономию электротехнической стали.

В табл. 14-5 показаны размеры стандартной рулонной электротехнической стали для вырубки листов сердечников двигателей с высотами оси вращения свыше 250 мм

Таблица 14-4

Наружные диаметры сердечника статора и соответствующая им ширина резаных лент электротехнической стали

h, мм	h_1, мм	$D_{н1макс}$, мм	Ширина резаных лент, мм, при штамповке				
			однорядной с припуском, мм				двухрядной с шахматным раскроем $b_{р.с}$
			отрицательным		положительным		
			$-\Delta_{шт}$	$b_{р.с}$	$+\Delta_{шт}$	$b_{р.с}$	
50	7,0	86	1	85	4	90	164
56	8,0	96	1	95	4	100	185
63	9,0	108	1	107	5	113	208
71	10,0	122	1	121	5	127	235
80	10,5	139	1	138	6	145	268
90	11,5	157	1	156	6	163	303
100	12,5	175	1	174	7	182	339
112	13,5	197	1	196	7	204	380
132	15,5	233	2	231	7	240	449
160	17,5	285	3	282	7	292	—
180	19,0	322	3	319	8	330	—
200	20,5	359	4	355	8	367	—
225	22,0	406	4	402	8	414	—
250	24,0	452	5	447	8	460	—

Примечание. Здесь стандартными значениями ширины резаных лент являются 90, 95, 107, 138 и 156 мм; ленты остальных размеров по ширине могут поставляться согласно ГОСТ 21427.2-75 по соглашению потребителя с изготовителем.

Таблица 14-5

Наружные диаметры сердечника статора и ширина стандартной рулонной электротехнической стали

h, мм	h_1, мм	$D_{н1макс}$, мм	$\Delta_{шт}$, мм	Ширина рулонной стали, мм
280	20	520	10	530
315	20	590	10	600
355	25	660	10	670
400	30	740	10	750
450	25	850	10	860
560	65	990	10	1000

В гл. 11 приведено уравнение (11-18), связывающее значение P_1/P'_1 с диаметром $D_{н1}$. Зависимости $P_1/P'_1 - f(D_{н1})$, вычисленные по этому уравнению, приведены на рис. 14-1. Значения коэффициента K и показателя степени $2+\gamma'$ соответствуют принятым в современных сериях уровням электромагнитных нагрузок A_1 и B_δ (см. рис. 14-7, 14-9) с учетом способа охлаждения, рационального заполнения пазов медью при толщине изоляции, приведенной в табл. 14-14 и 14-19, марок электротехнической стали по табл. 14-1.

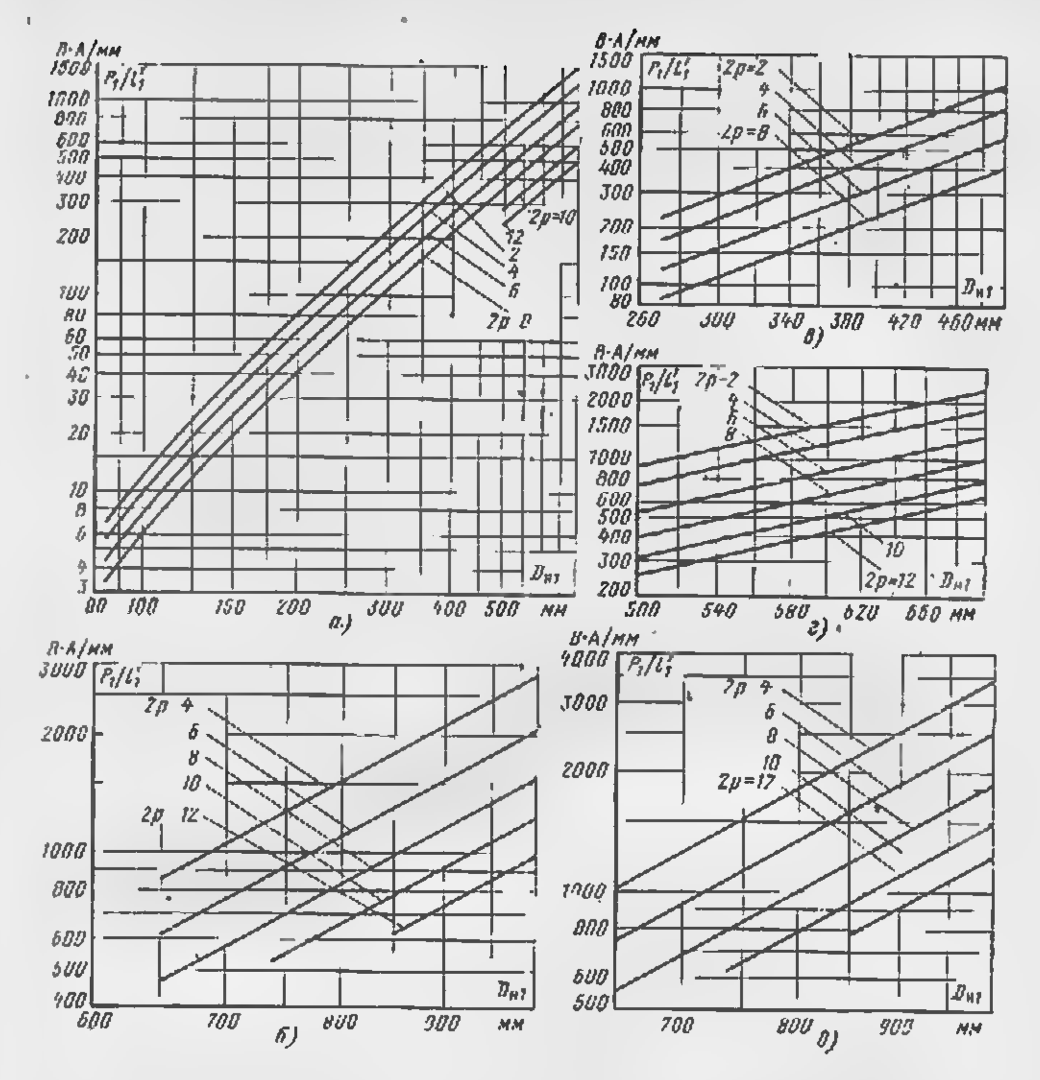


Рис. 14-1. Средние значения $P_1/l'_1=f(D_{н1})$ асинхронных двигателей

а — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, $U\leqslant660$ В, $D_{н1}=80\div500$ мм, при $D_{н1}>$ >500 мм дополнительное охлаждение продуванием ротора; *б* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0151, $U=6000$ В; $D_{н1}=650\div1000$ мм, *в* — со степенью защиты IP23, способом охлаждения IC01, $U\leqslant660$ В, $D_{н1}=270\div500$ мм, *г* — то же, $D_{н1}=500\div700$ мм, *д* — то же, $U=6000$ В, $D_{н1}=650\div1000$ мм.

Для двигателей с высотами оси вращения 50—132 мм ($D_{н1}\leqslant235$ мм) значения P_1/l'_1 на рис. 14-1,*а* предусматривают выполнение машин с изоляцией класса нагревостойкости *B*, так как при обеспечении необходимого уровня показателей (пусковых и энергетических характеристик, соответствующих критерию оптимума) превышения температур активных частей сравнительно низки. Для двигателей с высотами оси вращения 160—355 мм ($D_{н1}\approx285$—660 мм) значения P_1/l'_1 на рис. 14-1,*а*, *в*, *г* соответствуют выполнению машин с изоляцией класса нагревостойкости *F*. При этом на участке высот оси вращения 280—355 мм ($D_{н1}>500$ мм) значения P_1/l'_1 учитывают применение для обмотки статора прямоугольных эмалированных проводов.

Значения P_1/l'_1 на рис. 14-1,*б*, *д* для высоковольтных двигателей (6000 В) соответствуют выполнению машин с изоляцией класса нагревостойкости В

При проектировании серии двигателей с учетом перспективных достижений техники, обеспечивающих повышение заполнения паза медью (в результате перехода на более тонкую изоляцию), применение электротехнической стали с большей магнитной проницаемостью и меньшими удельными потерями, применение изоляции более высокого класса нагревостойкости с использованием ее по нагреву, коэффициент K следует повысить в соответствии с указаниями § 11-4, а значение P_1/l'_1 увеличить пропорционально значению K. Например, при применении изоляции других классов нагревостойкости, используемых по нагреву, значения P_1/l'_1, приведенные на рис. 14-1, могут быть приближенно изменены в соответствии с данными табл. 14-6.

Таблица 14-6

Относительные значения P_1/l'_1 в зависимости от класса нагревостойкости изоляции

h, мм	Рекомендуемый класс изоляции	P_1/l'_1 при изоляции класса		
		B	F	H
50—132	B	1,0	1,15	1,32
160—355	F	0,87	1,0	1,15
400—560	B	1,0	1,15	1,32

Вычисляют для двигателя большей мощности (второй длины) значение l'_1, мм,

$$l'_1 = \frac{P_1}{P_1/l'_1} \tag{14-2}$$

и определяют отношение $\lambda_2 = l'_1/D_{н1}$. Отношение λ_2 должно по возможности приближаться к предельным значениям $\lambda_{макс}$, приведеным на рис. 14-2,*а*—*г*.

Для низковольтных двигателей в исполнении IP23 с диапазоном диаметров $D_{н1}$—270÷700 мм на рис. 14-2,*б* и *в* значения $\lambda_{макс}$ даны при отсутствии радиальных вентиляционных каналов в сердечниках статора и ротора. Такое исполнение сердечников хотя и связано с некоторым ухудшением охлаждения двигателей, но оно обеспечивает большую производственную технологичность конструкции с соответствующим уменьшением массо-габаритных показателей.

Для высоковольтных двигателей с диапазоном диаметров $D_{н}$=650÷1000 мм (рис. 14-2,*г*) отношение $\lambda_{макс}$ имеет одинаковые значения для обоих исполнений: IP44 и IP23. Это объясняется унификацией длин сердечников. Сердечники этих двигателей имеют, как правило, радиальные вентиляционные каналы, способствующие более интенсивному охлаждению машин, поэтому значения $\lambda_{макс}$ для этих двигателей могут быть существенно больше, чем для двигателей с сердечниками без каналов предыдущих диапазонов диаметров $D_{н1}$.

Если в ущерб производственной технологичности конструкции низковольтных двигателей исполнения IP23 с диапазоном диаметров $D_{н1}$=—500÷700 мм принять выполнение сердечников статора и ротора с радиальными вентиляционными каналами (аналогично высоковольтным двигателям с диапазоном диаметров $D_{н1}$—650÷1000 мм), то значения

$\lambda_{макс}$ для этих двигателей могут быть увеличены по сравнению с указанными на графиках рис. 14-2,*в*: для меньших диаметров на 10—15%, для больших — до 30—40%.

Значение λ_1 для двигателя первой длины не регламентируется; оно получается делением значения λ_2 на коэффициент нарастания подводимой мощности (12-14).

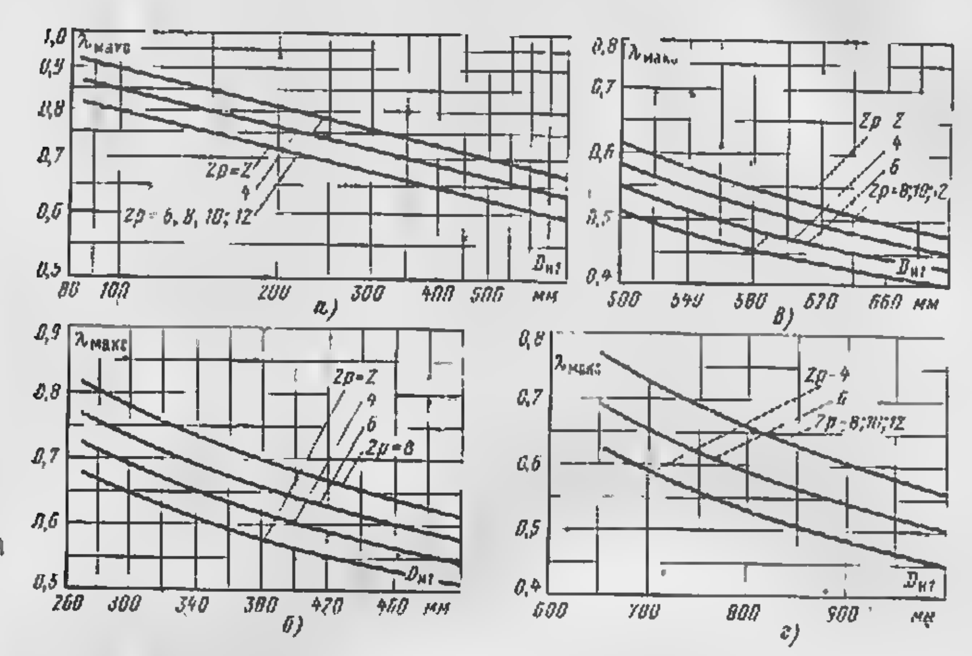


Рис. 14-2. Предельные значения $\lambda_{макс}=f(D_{н1})$ для асинхронных двигателей.

а — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141, $U \leqslant 660$ В, $D_{н1}=85 \div 700$ мм; *б* — со степенью защиты IP23, способом охлаждения IC01, $U \leqslant 660$ В, $D_{н1}=270 \div 500$ мм; *в* — то же, $D_{н1}=500 \div 700$ мм; *г* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0151, со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01, $U=6000$ В, $D_{н1}=650 \div 700$ мм.

При значительном превышении рекомендуемых пределов $\lambda_{макс}$ двигатель большей мощности переводят в следующую большую высоту оси вращения; если такой переход вызовет слишком большое снижение λ_2, то может выявиться необходимость в другой группировке двух соседних мощностей либо в проектировании двигателей с одной или тремя длинами на одном диаметре. При проектировании двигателей с одной длиной на диаметр высоту оси вращения выбирают так же, как для двигателя второй длины, т. е. по возможности приближаясь к предельным значениям $\lambda_{макс}$, приведенным на рис. 14-2.

Аналогично определяют основные размеры и для всех других отрезков серии, осуществляя таким образом общую ее структуру на данном участке, либо, как было указано выше, определяют основные размеры двигателей отрезков серии, находящихся на противоположных границах данного участка, и по методу, изложенному в § 11-2, находят значения K, $2+\gamma'$ и λ и с их помощью определяют основные размеры всех двигателей участка.

Внутренний диаметр сердечника статора D_1 можно определить из рис. 14-3,*а* и *б* при $U \leqslant 600$ В и $D_{н1}$—85÷500 мм, а из рис. 14-3,*в* — при

$U=6000$ В и $D_{н1}=650 \div 1000$ мм, а при $D_{н1}=500 \div 700$ мм по следующим значениям отношения $D_1/D_{н1}$:

$2p$	2	4	6	8	10, 12
$D_1/D_{н1}$	0,525	0,650	0,715	0,745	0,765

Наружный диаметр сердечника ротора, мм,

$$D_{н2}=D_1-2\delta, \qquad (14\text{-}2а)$$

где δ — воздушный зазор между статором и ротором, мм.

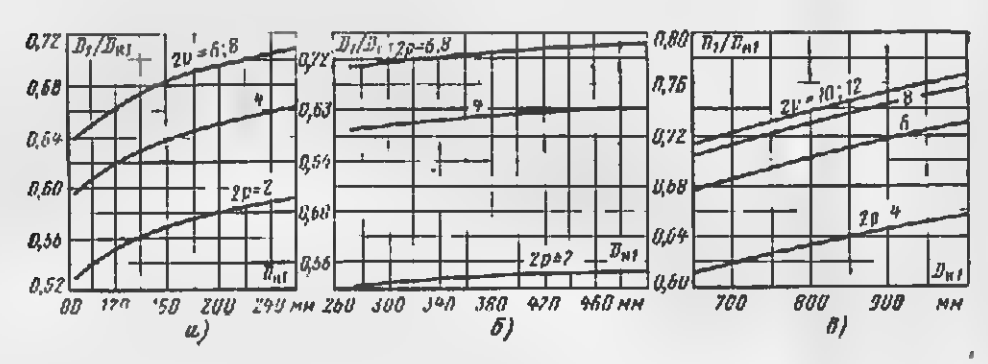


Рис. 14-3. Средние значения $D_1/D_{н1}=f(D_{н1})$.
$а$ — $U \leqslant 660$ В, $D_{н1}=85 \div 270$ мм; $б$ — то же, $D_{н1}=270 \div 500$ мм; $в$ — $U=6000$ В, $D_{н1}=650 \div 1000$ мм

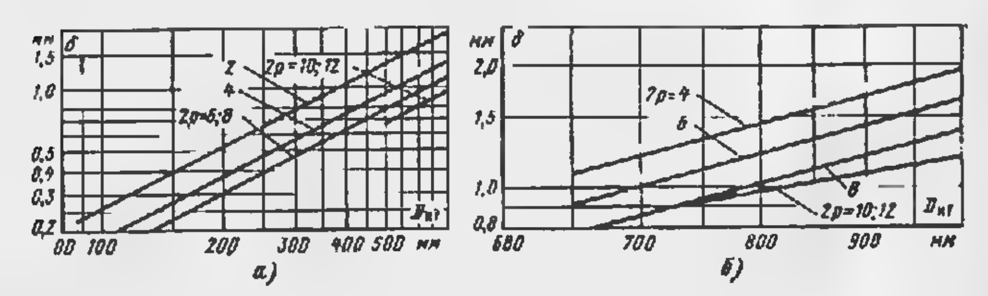


Рис. 14-4. Средние значения $\delta=f(D_{н1})$.
$а$ — $U \leqslant 660$ В; $б$ — $U=6000$ В

Значение δ влияет на энергетические и виброакустические показатели, использование активных материалов и надежность двигателей. При уменьшении зазора понижается реактивная составляющая тока холостого хода и, следовательно, повышается коэффициент мощности двигателя; вместе с тем увеличивается магнитное рассеяние, а следовательно, индуктивное сопротивление двигателя; увеличиваются добавочные потери, уменьшается фактический к. п. д. двигателя и увеличивается нагрев обмоток; увеличивается уровень шума и вибрации магнитного происхождения; возрастает нагрузка на вал и подшипники от силы магнитного притяжения; возникает опасность касания ротора о статор и тем самым понижается надежность двигателя. Таким образом, требования к размерам воздушного зазора неоднозначны.

При выборе воздушного зазора рекомендуется пользоваться установленными практикой электромашиностроения средними значениями δ из рис. 14-4,*а*, *б*. Выбранные значения δ следует округлять до 0,05 мм при $\delta \leqslant 0{,}5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0{,}5$ мм.

б) Дополнительные размеры

Внутренний диаметр листов ротора D_2, мм,

$$D_2 = k_в D_{н1}, \qquad (14\text{-}3)$$

где значения коэффициента $k_в$ могут быть с достаточным приближением взяты из табл. 14-7.

Таблица 14-7

Значения коэффициента $k_в$

h, мм	Номинальное напряжение U, В	$2p$	$k_в$	h, мм	Номинальное напряжение U, В	$2p$	$k_в$
50—63	≤380	2—6	0,19	400—560	6000	4	0,20
71—250	≤660	2—8	0,23			6	0,23
280—355	≤660	2	0,22			8—12	0,25
		4—12	0,23				

Таблица 14-8

Аксиальные каналы ротора

h, мм	$n_{к2} \times d_{к2}$, мм, при $2p$							
	2		4		6		8, 10, 12	
	IP44	IP23	IP44	IP23	IP44	IP23	IP44	IP23
250	10×15	10×15	10×20	10×20	10×30	10×30	10×30	10×30
280	12×20	—	12×32	12×26	12×32	12×40	12×32	12×40
315	12×20	—	12×40	12×32	12×40	12×40	12×40	12×40
355	12×20	—	12×50	12×40	12×50	12×40	12×50	12×40
400 (500)	—	—	9×55	9×55	9×65	9×65	9×75	9×75
450 (560)	—	—	9×65	9×65	9×85	9×85	9×90	9×90
560 (630)	—	—	9×85	9×85	9×105	9×105	9×110	9×110

Примечание. Значения h, заключенные в скобки, относятся к исполнению IP44 с распределенным воздухо-воздушным охладителем

Внутренний диаметр сердечника ротора D_2, определенный по (14-3), приблизительно соответствует наименьшему возможному диаметру вала с учетом предельного допустимого отношения $l'_1/D_{н1}$. В дальнейшем при выполнении механического расчета вала на жесткость (см. гл. 9) размер диаметра D_2 уточняется.

Рекомендуемые числа и диаметры аксиальных каналов $n_{к2}$ и $d_{к2}$, мм, располагаемых в один ряд, приведены в табл. 14-8.

Конструктивная длина сердечника статора, мм, при отсутствии радиальных вентиляционных каналов

$$l_1 = l'_1. \qquad (14\text{-}4)$$

При наличии радиальных вентиляционных каналов

$$l_1 = l'_1 + n_{к1} l_{к1}. \qquad (14\text{-}5)$$

Число радиальных вентиляционных каналов

$$n_{к1}=n_{п1}-1.$$

Число пакетов

$$n_{п1}=l'_1/l_{п1}.$$

Длину пакета $l_{п1}$ двигателей с фазным ротором или со сварной короткозамкнутой клеткой принимают равной 40—60 мм (длина крайних пакетов может быть несколько больше длины средних); длина радиального вентиляционного канала $l_{к1}=10$ мм.

У двигателей с короткозамкнутой литой клеткой ротора число радиальных каналов приходится уменьшать примерно вдвое с применением более длинных пакетов ввиду технологических трудностей, связанных с предотвращением затекания алюминия в радиальные каналы.

Число и длину радиальных вентиляционных каналов в роторе принимают такими же, как в статоре ($n_{к2}=n_{к1}$; $l_{к2}=l_{к1}$).

У двигателей с высотами оси вращения до 250 мм включительно длину сердечника ротора l_2 принимают равной длине сердечника статора l_1, а свыше 250 мм $l_2=l_1+5$ мм.

14-3. ОБМОТКА СТАТОРА

а) Тип и число витков обмотки

Наиболее широко применяемые в современной практике электромашиностроения типы обмотки и формы пазов статора в зависимости от номинального напряжения и высоты оси вращения приведены в табл. 14-9.

Таблица 14-9

Тип обмотки и форма пазов статора

U, В	h, мм	$2p$	Тип обмотки	Пазы (форма)
≤380	50—63	2; 4; 6	Однослойная всыпная концентрическая	Трапецеидальные полузакрытые
≤660	71—160	2; 4; 6; 8	То же	То же
≤660	180—250	2; 4; 6; 8	Двухслойная или одно-двухслойная всыпная	» »
≤660	280—355	2; 4; 6; 8	Двухслойная из жестких полукатушек	Прямоугольные полуоткрытые
≤660	280—315	10; 12	Двухслойная всыпная концентрическая	Трапецеидальные полузакрытые
≤660	355	10; 12	Двухслойная из жестких полукатушек	Прямоугольные полуоткрытые
6000	400—560	4; 6; 8; 10; 12	Двухслойная из жестких катушек	Прямоугольные открытые

У двигателей с высотами оси вращения 50—160 мм применяют полузакрытые пазы с однослойной концентрической двухплоскостной обмоткой из мягких секций. Такая обмотка облегчает применение автоматических станков для обматывания статоров двигателей данного участка высот оси вращения, выпускаемых в массовых количествах.

В двигателях с высотами оси вращения 180—250 мм применяют двухслойную обмотку с катушками из круглого провода; при ручной укладке катушки имеют одинаковые размеры и допускают изготовление на одном шаблоне. Для возможности применения механизированной укладки используют специальные схемы разносекционных одно-двухслойных и двухслойных концентрических обмоток [Л 33].

Двигатели на номинальные напряжения до 660 В с высотами оси вращения 280—355 мм при $2p=2$, 4, 6 и 8 и с высотой оси вращения 355 мм при $2p=10$ и 12 в существующих сериях выполняют с полуоткрытыми пазами и двухслойной обмоткой статора из жестких полукатушек, уложенных рядом по ширине паза и соединенных параллельно. Прямоугольные проводники в пазу располагают плашмя.

Таблица 14-10

Рекомендуемые значения q_1

h, мм	Значения q_1 при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
50—63	4	2	2	—		
71	4	2	2	1,5	—	
80—100	4	3	2	1,5	—	—
112—132	1	3	3	2	—	—
160	6	4	3	2	—	—
180—225	6	4	4	3	—	—
250	8	5	4	3	—	—
280—355	8	5	4	3	3	2,5
400—560	—	5	4	3	3	2,5

Десяти- и двенадцатиполюсные двигатели с высотами оси вращения 280 и 315 мм выполняют обычно с трапецеидальными полузакрытыми пазами статора и двухслойной всыпной концентрической обмоткой из круглого провода.

Двигатели с высотами оси вращения 400—560 мм на напряжение 6000 В выполняют с открытыми пазами и двухслойной обмоткой статора; по высоте паза укладывают две катушки. Прямоугольные проводники катушек располагают плашмя по ширине паза. У больших двигателей (мощностью 630—1000 кВт) эффективный проводник может подразделяться по ширине на два элементарных.

Число пазов на полюс и фазу статора

$$q_1=Z_1/2p\cdot 3. \qquad (14\text{-}6)$$

Значения q_1 не превышают 10; как правило, выбирают q_1 равным целому числу. В случае унификации листов статора двигателей с разными числами полюсов возможно применение дробного q (1,5; 2,5 и т. д.). Значения q_1, соответствующие числам пазов Z_1, указанным в табл. 14-2, приведены в табл. 14-10.

Обмотку статора выполняют шестизонной, с фазной зоной, равной 60° электрического угла, при q_1, равном целому числу, и диаметральном шаге.

Коэффициент распределения при шестизонной обмотке

$$k_{p1}=\frac{0,5}{q_1\sin(\alpha/2)}, \qquad (14\text{-}7)$$

где $\alpha=60°/q_1$;

При однослойной обмотке с числом пазов, равном целому числу, шаг по пазам — диаметральный,

$$y_{п1}=Z_1/2p. \quad (14\text{-}8)$$

Двухслойную обмотку обычно выполняют петлевой с укороченным шагом по пазам:

$$y_{п1}=\beta Z_1/2p. \quad (14\text{-}9)$$

Укорочение шага β близко или равно 0,83 при $2p\geq4$ и 0,58—0,63 при $2p=2$.

Укорочение шага у двухслойной обмотки улучшает форму кривой поля, снижая тем самым добавочные потери и провалы в кривой момента.

Таблица 14-11

Значения $k_{р1}$, $k_{у1}$ и $k_{об1}=f(q_1)$ двухслойной обмотки статора

q_1	$k_{р1}$	$\frac{Z_1}{2p}$	$2p=2$				$2p\geq4$			
			$y_{п1}$	β	$k_{у1}$	$k_{об1}$	$y_{п1}$	β	$k_{у1}$	$k_{об1}$
1,5	0,965	4,5	—	—	—	—	4	0,890	0,985	0,960
2	0,966	6	—	—	—	—	5	0,833	0,966	0,935
2,5	0,962	7,5	—	—	—	—	6	0,800	0,951	0,915
3	0,960	9	—	—	—	—	7	0,778	0,940	0,905
4	0,958	12	—	—	—	—	10	0,833	0,966	0,925
5	0,957	15	—	—	—	—	12	0,800	0,951	0,911
6	0,957	18	11	0,610	0,818	0,785	15	0,833	0,966	0,925
8	0,956	24	15	0,625	0,832	0,795	19	0,792	0,947	0,905

Коэффициент укорочения

$$k_{у1}=\sin(\beta\cdot 90^\circ). \quad (14\text{-}10)$$

Обмоточный коэффициент

$$k_{об1}=k_{р1}k_{у1}. \quad (14\text{-}11)$$

Вычисленные значения коэффициентов $k_{р1}$, $k_{у1}$ и $k_{об1}$ двухслойной обмотки для соответствующих значений q_1, взятых из табл. 14-10, приведены в табл. 14-11.

В некоторых случаях, с целью подбора наиболее рационального значения магнитного потока Ф (в частности, для обеспечения пусковых характеристик двигателя, соответствующих техническим требованиям) несколько уменьшают или увеличивают шаг по пазам $y_{п1}$, изменяя этим обмоточный коэффициент $k_{об1}$; значения коэффициента $k_{у1}$, соответствующие измененному шагу, находят, пользуясь формулами (14-9) и (14-10).

Для однослойной обмотки $k_{об1}=k_{р1}$.

В качестве примера на рис. 14-5 приведена развернутая схема однослойной, а на рис. 14-6 — двухслойной обмотки статора. Конфигурация лобовых частей обмотки на рис. 14-5 показана условно. На практике, особенно при применении механизированной укладки секций, конфигурация лобовых частей может быть иная (трапецеидальная, треугольная и т. п.).

На рис. 14-6,*а* показана обычная двухслойная обмотка, а на рис. 14-6,*б* — двухслойная концентрическая, которая за последние 10—15 лет нашла широкое применение в электромашиностроительной зарубежной практике и частично в отечественной (например, в двигателях 9-го га-

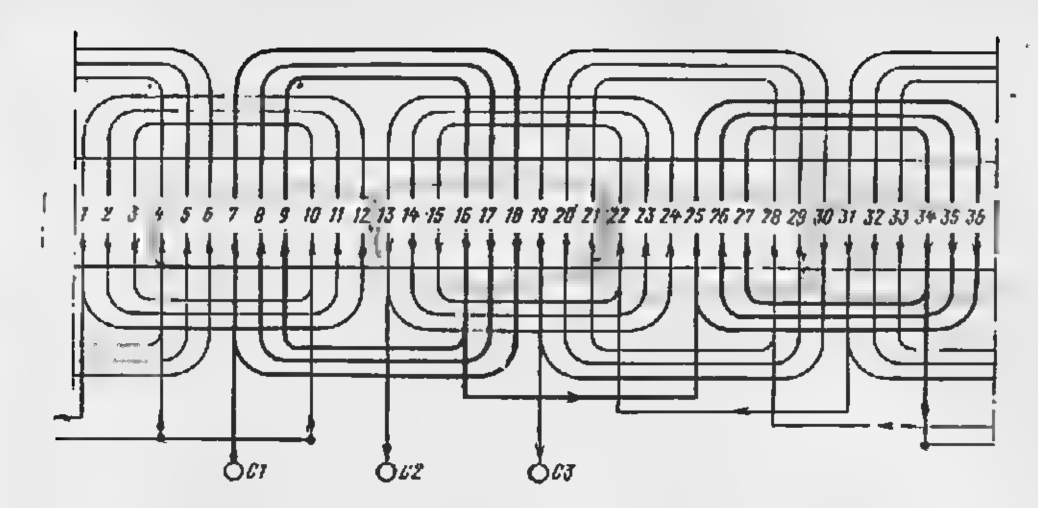


Рис. 14-5. Развернутая схема трехфазной однослойной концентрической обмотки статора при $Z_1=36$, $2p_1=4$, $q_1=3$, $y_{п1}=7, 9, 11$.

а)

б)

Рис. 14-6. Развернутая схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора.
а — обычная двухслойная обмотка при $Z_1=36$; $2p=4$, $q_1=3$; $y_{п1}=7$; $a=1$; б — двухслойная концентрическая обмотка при $Z_1=36$; $2p=4$; $q_1=3$; $y_{п1}=5, 7, 9$; $a=1$.

барита серии А2—АО2 и 10-, 12-полюсных двигателях серий А3—АО3 и 4А).

Двухслойную концентрическую обмотку легко образовать из обычной двухслойной обмотки, как это видно из сравнения рис. 14-6,*а* и 14-6,*б*, где показана одна и та же обмотка по пазовым частям, но различная по лобовым. Двухслойная концентрическая обмотка имеет более короткие лобовые части, чем обычная двухслойная, и позволяет осуществлять хорошую решетку между прямолинейными вылетами лобовых частей при выходе из пазов (см. также § 9-3,д), что в большой степени способствует улучшению охлаждения обмотки, особенно у двигателей со степенью защиты IP23. В двухслойную концентрическую может быть превращена любая обычная двухслойная обмотка. Укладка сторон катушек в верхние и нижние части пазов у этой обмотки выполняется не единичными катушками, а сразу катушечными группами с числом катушек, равным q_1. При q_1 достаточно большом и четном может быть применена укладка группами, равными $q_1/2$ (по принципу «развалки», применяемой в однослойной обмотке).

Обозначим предварительно установленную в § 14-2 длину сердечника статора через $l'_{1\text{предв}}$. Тогда предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре, Вб,

$$\Phi_{\text{предв}} = B_\delta D_1 l'_{1\text{предв}} \cdot 10^{-6}/p. \qquad (14\text{-}12)$$

Средние значения магнитной индукции B_δ в зависимости от наружного диаметра сердечника, числа полюсов при различных степенях защиты низковольтных и высоковольтных двигателей приведены на рис. 14-7.

Предварительное число витков в обмотке фазы

$$w_{1\text{предв}} = \frac{k_e U_1}{222 k_{об1}(f_1/50)\Phi_{\text{предв}}}, \qquad (14\text{-}13)$$

где k_e определяем по рис. 14-8.

Предварительное число эффективных проводников в пазу

$$N_{п1\text{предв}} = w_{1\text{предв}} a_1/pq_1, \qquad (14\text{-}14)$$

где a_1 — число параллельных ветвей обмотки фазы статора.

Параллельные ветви обмотки применяют при больших значениях фазного тока, требующих значительного увеличения площади поперечного сечения проводников, что снижает производственную технологичность обмотки. В ряде случаев, особенно у двигателей с малыми числами $N_{п1}$, наличие в обмотке параллельных ветвей облегчает расположение проводников в пазу с возможно большим приближением числа эффективных проводников к расчетному значению, получаемому из (14-14). Например, если у двухслойной обмотки при $a=1$ $N_{п1}=3$ (такая обмотка практически невыполнима), то применение в этой обмотке $a=2$ дает возможность выполнить ее с $N_{п1}=6$.

Параллельные ветви обмотки должны содержать одинаковое число витков, а стороны катушек — находиться в магнитном поле в одинаковых условиях, т. е. векторы э. д. с. параллельных ветвей должны быть равны и одинаково направлены. Возможное число параллельных ветвей должно быть одним из делителей числа полюсов; например при $2p=8$ возможные значения $a_1=1$; 2; 4.

Число эффективных проводников $N_{п1}$, полученное из (14-14), округляют до ближайшего целого числа. При этом у двухслойных обмоток

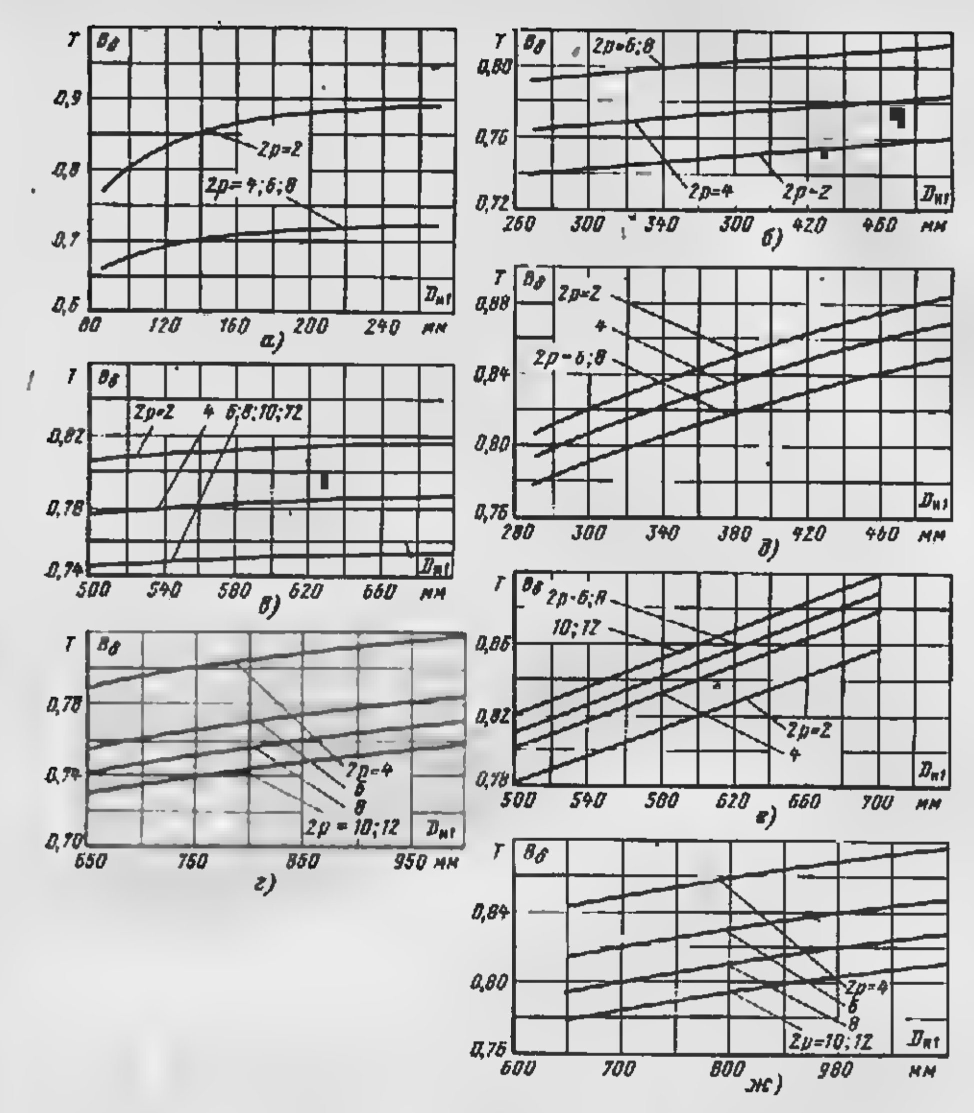


Рис. 14-7. Средние значения $B_\delta = f(D_{н1})$ асинхронных двигателей.

а — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=85 \div 270$ мм; *б* — то же, $D_{н1}=270 \div 500$ мм; *в* — то же, со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141 с продуваемым ротором, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=500 \div 700$ мм; *г* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0151, $U=6000$ В; *д* — со степенью защиты IP23, способом охлаждения IC01, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=270 \div 500$ мм, *е* — то же, $D_{н1}=500 \div 700$ мм; *ж* — то же, $U=6000$ В, $D_{н1}=650 \div 1000$ мм.

должно быть принято преимущественно четное число $N_{п1}$. Однако у двухслойных обмоток низковольтных асинхронных двигателей сравнительно большой мощности, в частности двигателей с высотами оси вращения свыше 250 мм, приходится иметь дело с очень малыми числами эффективных проводников в пазу, равными, например, 6, 8 и т. п. В связи с этим возникают серьезные затруднения при расчете машин, так как большие ступени перехода с одного четного значения $N_{п1}$ на другое мешают правильному подбору значений $N_{п1}$ при сохранении на

надлежащем уровне значений A_1 и B_δ без существенного изменения предварительно найденной длины сердечника l'_1. Выбор $N_{п1}$ существенно облегчается применением катушек с неравными числами витков, например 3+4, 4+5, 5+6 и т. д. При этом необходимо обращать особое внимание на шаг обмотки $y_{п1}$.

Пусть $(N_{п1}-1)/2=x$. Тогда чередование разновитковых катушек при укладке их в пазы статора будет следующим:

1) при $y_{п1}$, равном нечетному числу, чередование простое: x; $x+1$, x; $x+1$ и т. д.;

2) при $y_{п1}$, равном четному числу (обмотка осуществима только в том случае, когда $y_{п1}/2$ — нечетное число, а $Z_1/2$ — четное), чередование попарное: x, x; $x+1$, $x+1$; x, x; $x+1$, $x+1$ и т. д.

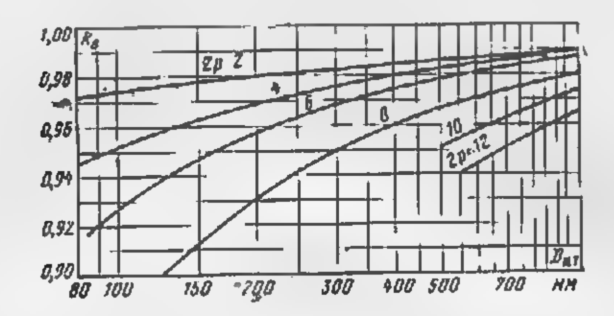


Рис. 14-8. Средние значения $k_в=f(D_{н1})$.

Особо осторожно следует подходить к выбору нечетных значений $N_{п1}$ в тех случаях, когда в обмотке предусматриваются параллельные ветви. При этом необходимо в каждую параллельную ветвь включить по одинаковому числу одинаковых катушечных групп, чтобы э. д. с. ветвей были одинаковы по значению и фазе. Условия образования симметричных параллельных ветвей при разновитковых катушках следующие:

при чередовании по п. 1: если q_1 — нечетное число, то отношение p/a_1 должно быть равно целому числу; если q_1 — четное число, то значения a_1 выбираются так же, как и для обмотки с равновитковыми катушками;

при чередовании по п. 2: если q_1 — нечетное число, то p/a_1 должно быть равно целому числу; если q_1 четное число, то для $q_1=2$ и $q_1=6$ отношение p/a_1 должно быть равно целому числу, а для $q_1=1$ значения a_1 выбираются так же, как и для обмотки с равновитковыми катушками.

Особое внимание следует обращать на возможность применения обмотки с разновитковыми катушками при числе параллельных ветвей, равном числу полюсов. В этих случаях, как видно из сказанного выше, при нечетных значениях q_1 неприемлемыми оказываются и четные, и нечетные значения $y_{п1}$, так как при этом параллельные ветви обмотки получаются несимметричными. Однако при достаточно больших значениях $N_{п1}$, равных 13, 15 и более, разница между числами эффективных витков параллельных ветвей составляет всего 3—2,5% и менее. Эту разницу, не столь существенно влияющую на повышение потерь в обмотке и ее нагрев от уравнительных токов, при отсутствии иных путей решения вопроса можно считать допустимой.

При дробных значениях q_1 (1,5; 2,5, см. табл. 14-10) и разновитковых катушках параллельные ветви обмотки симметричны, если в слу-

чае чередования по п. 1 отношение $p/2a_1$, а в случае чередования по п. 2 отношение $p/4a_1$ равны целым числам.

Уточненное число витков обмотки фазы статора из (14-14)

$$w_1 = N_{п1} p q_1 / a_1,$$

где $N_{п1}$ — принятое целое число эффективных проводников в пазу, округленное в соответствии с изложенными выше рекомендациями.

Эффективное число витков обмотки фазы статора

$$w_{эф1} = k_{об1} w_1. \quad (14\text{-}15)$$

Уточненная расчетная длина сердечника статора, мм,

$$l'_1 = l'_{1предв} w_{1предв} / w_1. \quad (14\text{-}16)$$

Значения l'_1 при длине сердечника менее 100 мм округляют до ближайшего целого числа, мм; при большей длине — до 5 или 10 мм. При $l'_1 > 300$ мм определяют количество радиальных вентиляционных каналов (при радиальной или радиально-аксиальной системе вентиляции) и размеры отдельных пакетов по длине сердечника в соответствии с § 14-2.

Уточненное значение магнитного потока, Вб,

$$\Phi = \Phi_{предв} w_{1предв} / w_1. \quad (14\text{-}17)$$

Номинальный фазный ток, А,

$$I_{1н} = P_1 / 3U_1. \quad (14\text{-}18)$$

Линейная нагрузка статора, А/см,

$$A_1 = 10 N_п Z_1 I_1 / \pi D_1 a_1. \quad (14\text{-}19)$$

Средний уровень линейных нагрузок в двигателях современных серий приведен для общей ориентации на рис. 14-9. При применении изоляции классов нагревостойкости, отличающихся от рекомендуемых в § 14-1, значения A_1, приведенные на рис. 14-9, могут быть приближенно изменены в соответствии с данными для P_1/l'_1 в табл. 14-6.

Расчетная высота спинки статора, мм,

$$h_{с1} = \Phi \cdot 10^6 / 2 l_{эф1} B_{с1}, \quad (14\text{-}20)$$

где $l_{эф1}$ — эффективная длина сердечника статора, мм, $l_{эф1} = k_с l'_1$; $B_{с1}$ — магнитная индукция в спинке статора, Т; $k_с$ — коэффициент заполнения сердечника статора сталью из табл. 14-1.

Магнитную индукцию в спинке статора $B_{с1}$ для двигателей со степенью защиты IP23 и IP44 в зависимости от высот оси вращения, номинального напряжения и числа полюсов принимают по табл. 14-12.

Следует отметить, что низкий уровень магнитной индукции $B_{с1}$ у тихоходных двигателей ($2p = 8$, 10, 12) связан с применяемой на практике унификацией статорных листов, худшими условиями охлаждения, необходимостью увеличения жесткости спинки статора для уменьшения вибраций магнитного происхождения.

При унификации листов статора двигателей с различными степенями защиты индукцию в спинке статора $B_{с1}$, как это видно из табл. 14-12, принимают для двигателей со степенью защиты IP44 на 5—10% ниже. При отсутствии унификации значения индукции $B_{с1}$ для

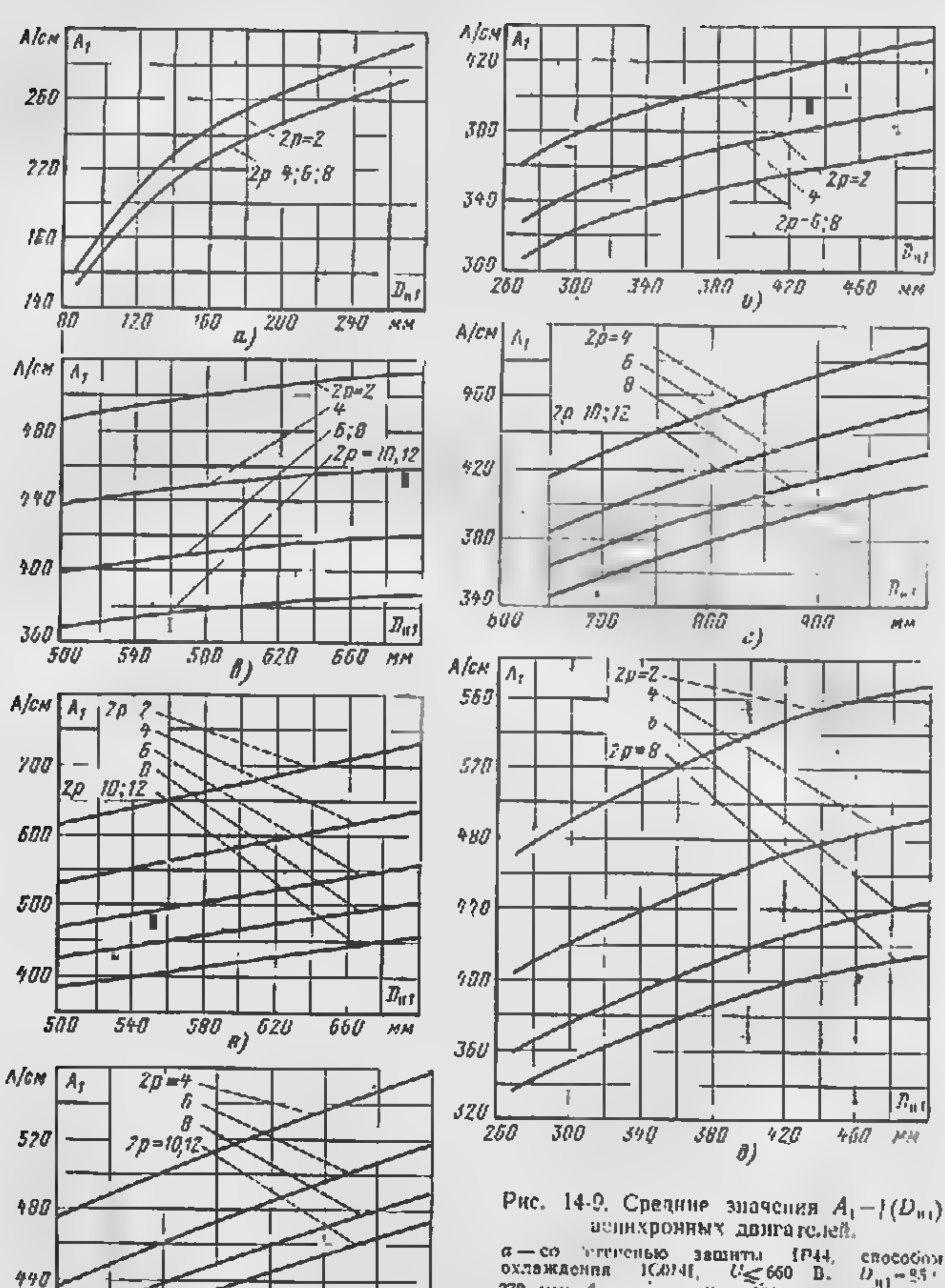


Рис. 14-9. Средние значения $A_1 = f(D_{н1})$ асинхронных двигателей.

а — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, $U \leq 660$ В, $D_{н1} = 85 \div 270$ мм; б — то же, $D_{н1} = 270 \div 660$ мм; в — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141 с продуваемым ротором, $U \leq 660$ В, $D_{н1} = 500 \div 700$ мм; г — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0151, $U = 6000$ В, $D_{н1} = 650 \div 1000$ мм; д — со степенью защиты IP23, способом охлаждения IC01, $U \leq 660$ В, $D_{н1} = 270 \div 500$ мм; е — то же, $D_{н1} = 500 \div 700$ мм; ж — то же, $U = 6000$ В, $D_{н1} = 850 \div 1000$ мм.

двигателей со степенью защиты IP44 могут быть приняты такими же, как и для двигателей со степенью защиты IP23.

Высота паза статора, мм,

$$h_{п1}=(D_{н1}-D_1)/2-h_{c1}. \qquad (14\text{-}21)$$

Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора, мм,

$$t_1=\pi D_1/Z_1. \qquad (14\text{-}22)$$

Таблица 14-12

Средние значения магнитной индукции в спинке статора

h, мм	U, В	$2p$	Магнитная индукция B_{c1}, Т, для двигателей со степенью защиты	
			IP44	IP23
50—132	≤660	2, 4	1,50—1,65	—
		6	1,45—1,60	—
		8	1,20—1,35	—
160—250	≤660	2, 4	1,45—1,60	1,55—1,70
		6	1,35—1,50	1,45—1,60
		8	1,10—1,20	1,20—1,30
280—355	≤660	2, 4, 6	1,35—1,50	1,45—1,60
		8, 10	1,30—1,45	1,40—1,55
		12	1,15—1,30	1,25—1,40
400—560	6000	4, 6, 8	1,30—1,40	1,40—1,50
		10	1,10—1,20	1,20—1,30
		12	0,90—1,00	1,00—1,10

Примечание. Значения B_{c1} целесообразно принимать в виде средних арифметических между указанными в таблице наименьшими и наибольшими значениями или несколько выше средних. При дальнейших расчетах наибольшие значения таблицы могут быть повышены, но не более чем на 5 %.

Таблица 14-13

Средние значения магнитной индукции в зубцах с параллельными стенками

h, мм	$2p$	Магнитная индукция $B_{з1}$, Т, для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
50—132	2, 4, 6	1,75—1,95	—
	8	1,70—1,90	—
160—250	2	1,75—1,95	1,90—2,10
	4, 6, 8	1,70—1,85	1,80—2,00
280—315	10, 12	1,60—1,80	1,70—1,90

б) Размеры трапецеидальных полузакрытых пазов и круглых проводников обмотки

Трапецеидальный полузакрытый паз показан на рис. 14-10,*а*.

Расчетная ширина зубца с равновеликим сечением, мм,

$$b'_{з1}=t_1B_\delta/k_cB_{з1}. \qquad (14\text{-}23)$$

Магнитная индукция в зубцах $B_{з1}$ принимается по табл. 14-13.

При выборе значений магнитной индукции $B_{з1}$ следует учитывать примечание к табл. 14-12.

Размеры трапецеидального паза при угле $\beta=45°$ (для двигателей с высотами оси вращения $h=50\div250$ мм):

большая ширина паза, мм,

$$b_1=\pi(D_1+2h_{п1})/Z_1-b_{з1}; \quad (14\text{-}24)$$

меньшая ширина паза, мм,

$$b_2=[\pi(D_1+2h_{ш}-b_{ш})-Z_1b_{з1}]/(Z_1-\pi), \quad (14\text{-}25)$$

где $b_{ш}$ принимаем из табл. 14-16.

Площадь поперечного сечения паза в штампе, мм²,

$$Q_{п1}=\frac{b_1+b_2}{2}\left(h_{п1}-h_{ш}-\frac{b_2-b_{ш}}{2}\right). \quad (14\text{-}26)$$

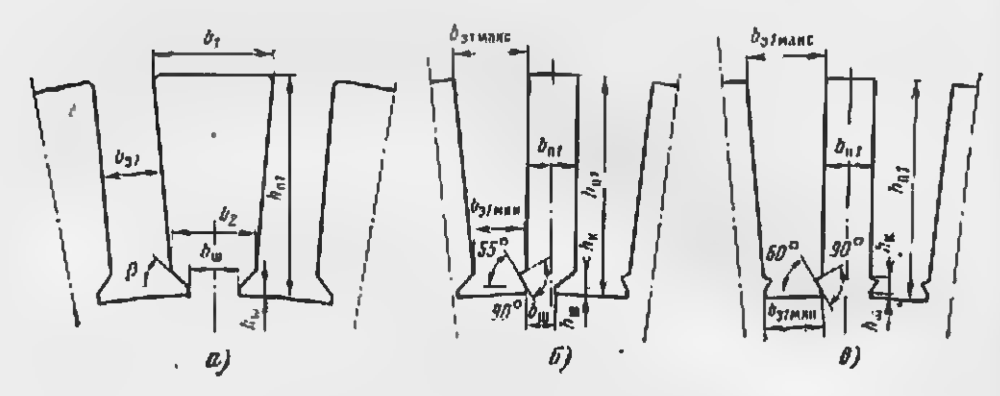


Рис. 14-10. Форма и размеры пазов статора.
а — трапецеидального полузакрытого; б — прямоугольного полуоткрытого, в — прямоугольного открытого.

Площадь поперечного сечения паза в свету, мм²,

$$Q'_{п1}=[(b_1+b_2)/2-b_c][h_{п1}-h_{ш}-(b_2-b_{ш})/2-h_c], \quad (14\text{-}27)$$

где b_c и h_c — припуски на сборку сердечников по ширине и высоте паза, мм, принимаются из табл. 14-3.

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой, мм²,

$$Q''_{п1}=Q'_{п1}-Q_{п}-Q_{пр}, \quad (14\text{-}28)$$

где $Q_{п}$ — площадь поперечного сечения корпусной изоляции, мм²; $Q_{пр}$ — площадь поперечного сечения прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином, мм²,

$$Q_{п}=b_{и}(2h_{п1}+b_1+b_2), \quad (14\text{-}29)$$

где $b_{и}$ — односторонняя толщина корпусной изоляции, мм, значения которой приведены в табл. 14-14. Данные по изоляции приведены в табл. 9-3 и 9-5.

При определении $Q_{п1}$ и $Q'_{п1}$ учитывают только площадь, занимаемую обмоткой. Трапецеидальная часть паза между b_2 и $b_{ш}$ используется для крепления обмотки либо крышкой (при $h=50\div160$ мм), либо клином (при $h=180\div315$ мм). Предварительно для определения $Q_{пр}$ можно воспользоваться данными табл. 14-15.

У двигателей с высотами оси вращения 50—132 мм принимают $h_ш=0,5$, а с высотами оси вращения 160—315 мм $h_ш=1,0$ мм.

Размеры трапецеидального паза, мм, при угле $\beta=30°$ (для двигателей с высотами оси вращения $h=280$ 315 мм, $2p=10$, 12):

бóльшая ширина паза b_1 по (14-24);

меньшая ширина паза, мм,

$$b_2=[\pi(D_1+2h_ш-b_ш/\sqrt{3})-Z_1b_{з1}]/(Z_1-\pi/\sqrt{3}). \qquad (14\text{-}30)$$

Площадь поперечного сечения паза в штампе, мм²,

$$Q_п=\frac{b_1+b_2}{2}\left(h_{п1}-h_ш-\frac{b_2-b_ш}{2\sqrt{3}}\right). \qquad (14\text{-}31)$$

Площадь поперечного сечения паза в свету, мм²,

$$Q'_{п1}=\left(\frac{b_1+b_2}{2}-b_c\right)\left(h_{п1}-h_ш-\frac{b_2-b_ш}{2\sqrt{3}}-h_c\right). \qquad (14\text{-}32)$$

Значения $Q''_{п1}$, h_c, $b_п$, $Q_п$, $Q_{пр}$, $h_ш$, b_c и $b_ш$ определяют так же, как для пазов с углом β, равным 45°.

Таблица 14-14

Значения $b_п$ двигателей с полузакрытыми пазами статора

h, мм	$b_п$, мм, при классе нагревостойкости изоляции		
	B	F	H
50—80	0,20	0,20	0,20
90—132	0,25	0,25	0,25
160—250	0,40	0,40	0,40
280—315	0,55	0,58	0,56

Таблица 14-15

Значения $Q_{пр}$ двигателей с полузакрытыми пазами статора

h, мм	Тип обмотки	$Q_{пр}$, мм²
50—160	Однослойная	—
180—250	Двухслойная	$0,4b_1+0,9b_2$
280—315	То же	$0,6(b_1+b_2)$

Проводники круглого поперечного сечения располагаются в полузакрытых пазах статора беспорядочно. При этом диаметр провода должен быть таким, чтобы коэффициент заполнения паза изолированными проводами $k_п$ был равен при ручной укладке 0,7—0,75, а на статорообмоточных станках — около 0,7—0,72 (см. § 9-3):

$$k_п=N_{п1}(d')^2/Q''_{п1}, \qquad (14\text{-}33)$$

где d' — диаметр провода с изоляцией, мм.

Для обмоток статоров с полузакрытыми пазами рекомендуется применение следующих марок проводов круглого поперечного сечения: ПЭТВ или ПЭТВМ при классе нагревостойкости B и ПЭТ-155 или ПЭТМ при классе нагревостойкости F (см. § 7-2).

Двигатели с изоляцией класса нагревостойкости H следует проектировать с обмоткой статора из проводов с эмалевой изоляцией на базе полиимидного лака, выпуск которых должен быть освоен отечественной промышленностью; двусторонняя толщина изоляции у этих проводов такая же, как у проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155.

Допустимый диаметр изолированного проводника, мм, из (14-33) равен:

$$d'=\sqrt{k_пQ''_{п1}/N_{п1}}.$$

Для повышения надежности всыпной обмотки и облегчения ее укладки диаметр d' не должен превышать у двигателей с механизированной укладкой обмотки ($h \leqslant 160$ мм) 1,33 мм, а у двигателей с ручной укладкой ($h \geqslant 180$ мм) 1,71 мм. При больших значениях d' эффективные проводники подразделяют на элементарные. Число элементарных проводников обычно не превышает пяти-шести и только у двухполюсных двигателей увеличивается до восьми-девяти.

По приложению 30 следует найти ближайший необходимый диаметр d' и соответствующие ему значения диаметра d и площади поперечного сечения q неизолированного провода. После этого уточняют коэффициент заполнения паза

$$k_{п}=cN_{п1}(d')^2/Q''_{п1}, \tag{14-34}$$

где c — число элементарных проводников в эффективном проводнике.

Таблица 14-16

Средние значения ширины шлица полузакрытого паза статора

h, мм	$b_{ш}$, мм, при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
50—63	1,8	1,8	1,8	1,8	—	—
71	2,0	2,0	2,0	2,0	—	—
80, 90	3,0	3,0	2,7	2,7	—	—
100, 112	3,5	3,5	3,0	3,0	—	—
132	4,0	3,5	3,5	3,5	—	—
160—250	4,0	3,7	3,7	3,7	—	—
280—315	—	—	—	—	4,0	4,0

Если $k_{п}$ окажется больше допустимого (см. выше), то соответственно уменьшают диаметр провода или же несколько увеличивают размеры паза по высоте и ширине, если при уменьшении диаметра провода коэффициент заполнения паза окажется слишком заниженным.

Для облегчения ручной укладки проводников края корпусной изоляции выпускают наружу через шлиц паза; это требует соответствующего увеличения ширины шлица $b_{ш}$; увеличение ширины шлица необходимо также по условиям механизированной укладки.

При одном и том же штампе, т. е. при неизменном числе пазов и их размеров, могут применяться обмотки с различными числами и диаметрами проводников (для различных порядковых длин сердечника, различных номинальных напряжений, ряда модификаций и т. д.), поэтому ширину шлица $b_{ш}$ принимают несколько больше суммы двусторонней толщины корпусной изоляции и максимального диаметра изолированных проводников, которые могут быть применены для данного паза. Рекомендуемые для двигателей с полузакрытыми пазами значения $b_{ш}$ приведены в табл. 14-16.

Плотность тока в обмотке статора, А/мм²,

$$J_1=I_1/cqa. \tag{14-35}$$

Характеристикой тепловой нагрузки обмотки статора является произведение A_1J_1, А²/(см·мм²), пропорциональное плотности теплового потока. У проектируемого двигателя определяют указанное произведение и сравнивают его со средним допустимым значением из рис. 14-11,*а*—*ж*. При применении изоляции классов нагревостойкости, отличающихся от рекомендуемых в § 14-2, значения произведения A_1J_1,

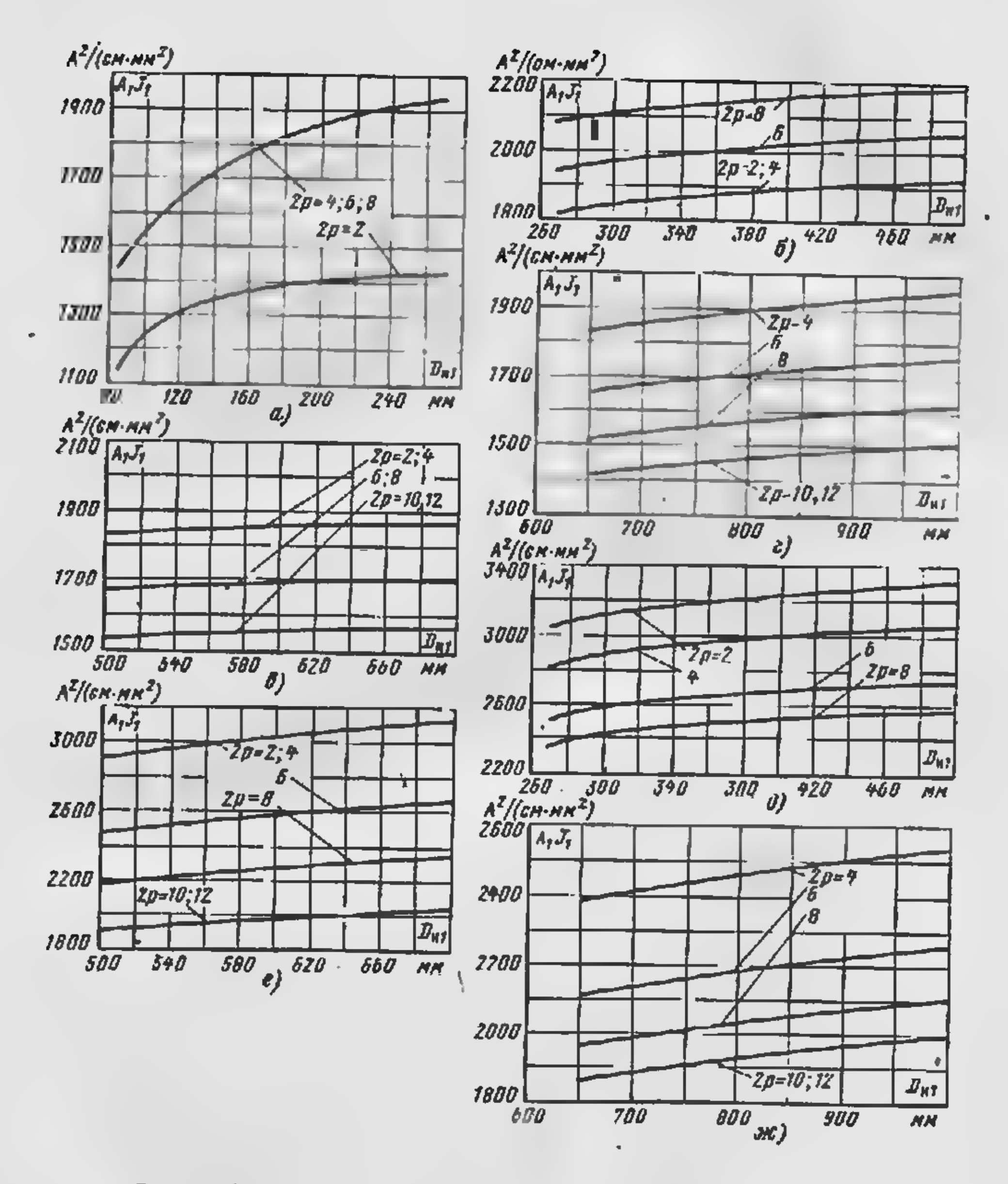


Рис. 14-11. Средние значения $A_1J_1=f(D_{н1})$ асинхронных двигателей.

а — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=85 \div 270$ мм; *б* — то же, $D_{н1}=270 \div 500$ мм; *в* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141 с продуваемым ротором, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=500 \div 700$ мм; *г* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0151, $U=6000$ В, $D_{н1}=650 \div 1000$ мм; *д* — со степенью защиты IP23, способом охлаждения IC01, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=270 \div 500$ мм; *е* — то же, $D_{н1}=500 \div 700$ мм; *ж* — то же, $U=6000$ В, $D_{н1}=650 \div 1000$ мм

приведенные на рис. 14-11,*а*—*ж*, могут быть приближенно изменены в соответствии с табл. 14-17.

Если полученное из расчета значение A_1J_1 превышает допустимое значение более чем на 10%, выбирают проводник большего диаметра с учетом соответствующего уменьшения плотности тока J_1. Для размещения проводников в пазу с допустимым коэффициентом заполнения увеличивают площадь паза, занимаемую обмоткой, для чего уменьшают примерно на один и тот же процент размеры h_{c1} и $b_{з1}$, следя за тем, чтобы индукции B_{c1} и $B_{з1}$ не превосходили допустимых значений с учетом примечания к табл. 14-12. В некоторых случаях произведение A_1J_1 приходится уменьшать за счет перехода на меньшее число проводников в пазу $N_{п1}$ с увеличением их поперечного сечения, индукции B_δ и магнитного потока Ф и с некоторым уменьшением размеров паза. При этом оказывается необходимым несколько увеличивать длину сердечника l_1 для сохранения индукции на должном уровне. После решения этих вопросов выполняют повторный расчет по (14-21)—(14-35).

Таблица 14-17

Относительные значения A_1J_1 в зависимости от класса нагревостойкости изоляции

h, мм	Рекомендуемый класс нагревостойкости изоляции	Значения A_1J_1 при классе нагревостойкости изоляции		
		B	F	H
50—132	B	1,0	1,33	1,75
≥160	F	0,75	1,0	1,30

Средняя ширина катушки обмотки статора, мм,

$$b_{ср}=t_{ср}y_{п1}, \tag{14-36}$$

где $t_{ср}$ — среднее зубцовое деление статора, мм,

$$t_{ср}=\pi(D_1+h_{п1})/Z_1.$$

Средняя длина одной лобовой части катушки, мм,

$$l_{л1}=(1,16+0,14p)b_{ср}+15. \tag{14-37}$$

Средняя длина витка обмотки, мм,

$$l_{ср1}=2(l_1+l_{л1}). \tag{14-38}$$

Длина вылета лобовой части обмотки, мм:
при $h\leq132$ мм

$$l_{в1}=(0,19+0,1p)b_{ср}+10; \tag{14-39}$$

при $h\geq160$ мм

$$l_{в1}=(0,12+0,15p)b_{ср}+10. \tag{14-40}$$

в) Размеры прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов и прямоугольных проводников обмотки

Прямоугольные полуоткрытые и открытые пазы показаны на рис. 14-10,*б* и *в*.

Ширина зубца в наиболее узком месте, мм,

$$b_{з1мин}=t_1B_\delta/k_cB_{з1макс}. \tag{14-41}$$

Магнитная индукция в расчетном наименьшем сечении зубца $B_{з1мин}$ может быть предварительно принята по табл. 14-18.

При предварительном выборе значений магнитной индукции $B_{з1макс}$ следует учитывать примечание к табл. 14-12.

Ширина полуоткрытого паза в штампе, мм,

$$b_{п1}=t'_1-b_{з1мин}. \quad (14\text{-}42)$$

где $t'_1=\pi(D_1+2h_ш+2h_к)/Z_1$, мм; $h_ш$ — высота шлица (усика), принимаемая для полуоткрытых пазов равной 1,0 мм; $h_к$ — высота клина по данным табл. 14-20.

Ширину шлица (открытия) $b_ш$ полуоткрытого паза принимают равной примерно $0{,}6b_{п1}$.

Таблица 14-18

Средние значения магнитной индукции в зубцах статора с полуоткрытыми и с открытыми пазами

h, мм	Форма пазов	$2p$	Магнитная индукция $B_{з1макс}$, Т, для двигателей со степенью защиты	
			IP44	IP23
280—355	Полуоткрытые	2	1,75—1,95	1,90—2,10
		4—12	1,70—1,85	1,80—2,00
400—500	Открытые	4—12	1,60—1,80	1,70—1,90

Ширина открытого паза в штампе, мм,

$$b_{п1}=t_1-b_{з1мин}. \quad (14\text{-}43)$$

Для контроля следует учитывать, что для полуоткрытых пазов отношение $b_{п1}/t'_1$ должно находиться в следующих пределах:

$2p$	2	4; 6; 8	10; 12
$b_{п1}/t'_1$	0,51—0,58	0,46—0,53	0,51—0,53

Бóльшие значения относятся к меньшим $D_{н1}$.

Для открытых пазов размер $b_{п1}$ должен приближаться к $(0{,}45—0{,}5)t_1$, причем целесообразно стремиться к нижнему пределу.

При проводниках прямоугольного поперечного сечения размеры полуоткрытых и открытых пазов определяют непосредственным суммированием размеров изолированных проводников, пазовой изоляции, а также припусков на сборку сердечника по высоте и по ширине паза.

Допустимая высота проводника с витковой изоляцией, мм,

$$h'=(h_{п1}-h_и-h_к-h_ш-h_с)/N_в; \quad (14\text{-}44)$$

допустимая ширина проводника с витковой изоляцией, мм,

$$b'=(b_{п1}-b_и-b_с)/N_ш. \quad (14\text{-}45)$$

Здесь $h_и$, $b_и$ — общая толщина изоляции, мм, в пазу статора по его высоте и ширине, указанная в табл. 14-19 в зависимости от номинального напряжения, формы пазов и класса нагревостойкости изоляции, в этих значениях толщины изоляции учтены необходимые технологические зазоры на укладку обмотки, а также толщина всех изоляционных прокладок (см. § 9-3,д) и не учитываются толщина витковой изоляции

л высота клина, предназначенного для крепления обмотки в пазах; высоту клина $h_к$ принимают по данным табл. 14-20; высоту шлица $h_ш$ для открытых пазов принимают равной 1,0 мм; припуски на сборку сердечника статора по высоте и ширине паза h_c и b_c берут из табл. 14-3, $N_в$, $N_ш$ — числа проводников соответственно по высоте и ширине паза; при полуоткрытых пазах $N_ш$=2, при открытых — $N_ш$=1 или 2.

Таблица 14-19

Значения $h_и$ и $b_и$ двигателей с полуоткрытыми и открытыми пазами статора

h, мм	U, В	Форма паза	$h_и$, мм, при классе нагревостойкости изоляции		$b_и$, мм, при классе нагревостойкости изоляции	
			B, F	H	B, F	H
280—355	≤660	Полуоткрытые	4,5	4,5	2,2	2,2
280—355	≤660	Открытые	4,5	4,5	1,8	1,8
400—560	6000	Открытые	12,4	—	4,1	—

Таблица 14-20

Высота клина $h_к$ полуоткрытого и открытого пазов статора

h, мм	$h_к$, мм, при числе полюсов	
	2	4, 6, 8, 10, 12
280—355	3,5	3,0
400—560	—	3,5

Число элементарных проводников в эффективном проводнике определяется наибольшей допустимой по условиям технологии изготовления обмоток площадью поперечного сечения элементарного провода и его наибольшей шириной. Наибольшая площадь поперечного сечения элементарного провода обычно составляет:

для низковольтных двигателей с высотами оси вращения 280—355 мм при полуоткрытых пазах статора около 10 мм² при наибольшей ширине около 4,7 мм;

для высоковольтных двигателей с высотами оси вращения 400—560 мм около 18 мм² при наибольшей ширине около 7,4 мм.

Размеры неизолированных прямоугольных проводов определяют вычитанием из значений h' и b', полученных по (14-44) и (14-45), толщины двусторонней витковой изоляции; затем подбирают ближайшие стандартные размеры проводов (см. приложение 31).

Для обмоток статоров с полуоткрытыми и открытыми пазами рекомендуется применять следующие марки проводов прямоугольного поперечного сечения:

Изоляция класса нагревостойкости	Номинальное напряжение U, В			
	≤660		6000	
	Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции, мм	Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции, мм
B	ПЭТВП	0,15	ПЭТВСД	0,45
F	ПЭТП-155	0,15	—	0,45
H	—	0,15	—	—

Двигатели на номинальное напряжение до 660 В с изоляцией класса нагревостойкости Н следует проектировать с обмоткой статора из прямоугольных проводов с эмалевой изоляцией на базе полиимидного лака, выпуск которых должен быть освоен отечественной промышленностью. Размеры этих проводов и толщину изоляции можно предварительно принимать такими же, как для проводов ПЭТВП и ПЭТП-155.

Площадь поперечного сечения прямоугольных проводов стандартных размеров определяют по данным приложения 31. Для эмалированных проводов площадь поперечного сечения, мм², может быть определена по формуле

$$q = ab - 0{,}215a^2, \tag{14-46}$$

где a и b — меньший и больший размеры провода, мм. Эта формула учитывает то, что эмалированные провода имеют по кромкам закругления с радиусом, равным $a/2$, для более равномерного распределения эмалевого слоя по поверхности провода в процессе его изготовления (во избежание утоньшения эмалевой пленки на углах).

Выбрав стандартные размеры провода, устанавливают его размеры с изоляцией и уточняют размеры пазов в штампе, мм:

$$h_{п1} = N_в h' + h_и + h_к + h_ш + h_c; \tag{14-47}$$

$$b_{п1} = N_ш b' + b_и + b_c. \tag{14-48}$$

Размеры $h_{п1}$ и $b_{п1}$ округляют до ближайшей бо́льшей десятой доли миллиметра и уточняют значения индукций $B_{с1}$ и $B_{з1макс}$.

Конструкция изоляции обмоток статоров с полуоткрытыми и открытыми пазами приведена в табл. 9-4 и 9-6.

Плотность тока в обмотке статора определяют по (14-35).

Произведение $A_1 J_1$ проектируемого двигателя сравнивают со средними допустимыми значениями из рис. 14-11 для двигателей с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами. Эти значения соответствуют исполнению машин с изоляцией класса нагревостойкости F. При других классах нагревостойкости изоляции значения произведения $A_1 J_1$, приведенные на рис. 14-11, могут быть приближенно изменены в соответствии с табл. 14-17 (для двигателей с высотами оси вращения 160 мм и более).

Если полученное при проектировании двигателя значение произведения $A_1 J_1$ превышает допустимое значение более чем на 10%, то выбирают прямоугольный провод бо́льших размеров с учетом соответствующего уменьшения плотности тока J_1 и соответственно увеличивают размеры паза, следя за тем, чтобы индукции $B_{с1}$ и $B_{з1макс}$ не превосходили допустимых значений с учетом примечания к табл. 14-12, а также чтобы ширина паза $b_{п1}$ не превосходила $0{,}5t_1$. В некоторых случаях произведение $A_1 J_1$ приходится уменьшать за счет перехода на меньшее число проводников в пазу $N_{п1}$ с увеличением их поперечного сечения, соответствующим увеличением магнитного потока Φ и индукции B_δ и некоторым уменьшением размеров паза, а в отдельных случаях для сохранения магнитных индукций на должном уровне — и с небольшим увеличением длины сердечника l_1. После окончательного выбора размеров паза выполняют повторный расчет по (14-21) и (14-41)—(14-45).

Среднюю ширину катушки $b_{ср}$ определяют по (14-36).

Средняя длина лобовой части катушки, мм:

при номинальном напряжении $U \leqslant 660$ В

$$l_{л1} = \frac{b_{ср}}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 3,5)/t_1]^2}} + h_{п1} + 50; \qquad (14\text{-}49)$$

при номинальном напряжении $U = 6000$ В

$$l_{л1} = \frac{b_{ср}}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 6,5)/t]^2}} + h_{п1} + 90. \qquad (14\text{-}50)$$

Среднюю длину витка обмотки $l_{ср1}$ определяют по (14-38).

Вылет лобовой части обмотки, мм:

при номинальном напряжении $U \leqslant 660$ В

$$l_{в1} = \frac{b_{ср}(b_{п1} + 3,5)/2t_1}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 3,5)/t_1]^2}} + \frac{h_{п1}}{2} + 25; \qquad (14\text{-}51)$$

при номинальном напряжении $U = 6000$ В

$$l_{в1} = \frac{b_{ср}(b_{п1} + 6,5)/2t_1}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 6,5)/t_1]^2}} + \frac{h_{п1}}{2} + 45. \qquad (14\text{-}52)$$

14-4. ОБМОТКИ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА

а) Форма пазов ротора

Короткозамкнутые роторы двигателей общего применения выполняют с овальными полузакрытыми или закрытыми, бутылочными закрытыми и прямоугольными открытыми пазами. Рекомендуемые формы пазов в зависимости от номинального напряжения, высот оси вращения и чисел полюсов двигателей приведены в табл. 14-21 и на рис. 14-12.

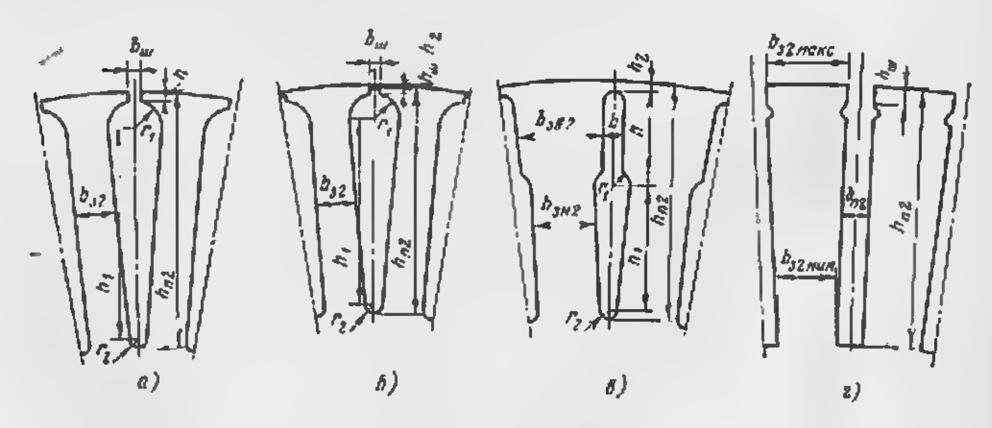


Рис. 14-12. Форма и размеры пазов короткозамкнутого ротора.
а — овального полузакрытого; *б* — овального закрытого; *в* — бутылочного закрытого; *г* — прямоугольного открытого.

Обмотка роторов при $h \leqslant 355$ мм литая алюминиевая; вместе со стержнями отливают короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки. Обмотку роторов при $h = 400 \div 560$ мм выполняют из прямоугольных алюминиевых шин, которые укладывают в открытые пазы

ротора и приваривают к алюминиевым короткозамыкающим кольцам аргонодуговой сваркой. В СССР имеется опыт заливки роторов взрывозащищенных асинхронных двигателей с $D_{н1}$ до 990 мм. Этот опыт будет в дальнейшем распространен и на двигатели общего назначения с высотами оси вращения свыше 355 мм.

Зубцовое деление t_2 по наружному диаметру ротора, мм,

$$t_2 = \pi D_{н2}/Z_2. \tag{14-53}$$

Таблица 14-21

Форма пазов короткозамкнутого ротора

U_1, В	h, мм	$2p$	Форма паза по рисунку
≤660	50—132	2; 4; 6; 8	14-12,*а*
	160—225	2; 4; 6; 8	14-12,*б*
	250	4; 6; 8	14-12,*б*
	250	2	14-12,*в*
	280—355	2; 4; 6; 8	14-12,*в*
	280—355	10; 12	14-12,*б*
6000	400—560	4; 6; 8; 10; 12	14-12,*г*

б) Размеры овальных полузакрытых и закрытых пазов ротора

Размеры овальных полузакрытых и закрытых пазов ротора (рис. 14-12,*а*, *б*) выбирают с учетом обеспечения равновеликого поперечного сечения зубцов (в отдельных случаях для обеспечения необходимого начального пускового момента больший диаметр овального паза может быть уменьшен). Ширина зубца в расчетном сечении, мм,

$$b_{з2} = t_2 B_\delta / B_{з2} k_c, \tag{14-54}$$

где k_c принимается по табл. 14-1.

Таблица 14-22

Средние значения магнитной индукции в зубцах короткозамкнутого ротора с овальными пазами

h, мм	$2p$	Магнитная индукция $B_{з2}$, Т, для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
50—132	2, 4, 6	1,75—1,95	—
	8	1,70—1,90	—
160—250	2	1,70—1,95	1,85—2,10
	4, 6, 8	1,65—1,90	1,75—2,00
280—355	2	1,60—1,85	1,75—2,00
	4	1,80—2,00	1,95—2,20
	6—12	1,65—1,90	1,75—2,00

Магнитная индукция в расчетном сечении зубца $B_{з2}$ может быть принята по табл. 14-22.

При выборе значений магнитной индукции $B_{з2}$ следует учитывать примечание к табл. 14-12.

Размеры и площади поперечного сечения пазов определяют в следующем порядке:

больший радиус, мм,

$$r_1 = \frac{\pi(D_{н2} - 2h_{ш1} - 2h_2) - Z_2 b_{z2}}{2(Z_2 + \pi)}; \qquad (14\text{-}55)$$

для овального полузакрытого паза $h_{ш}=0{,}5$ мм (при $h=50\div100$ мм) и 0,75 мм (при $h=112\div132$ мм), $h_2=0$;

для овального закрытого паза $h_{ш}=0{,}7$ мм, $h_2=0{,}3$ мм.

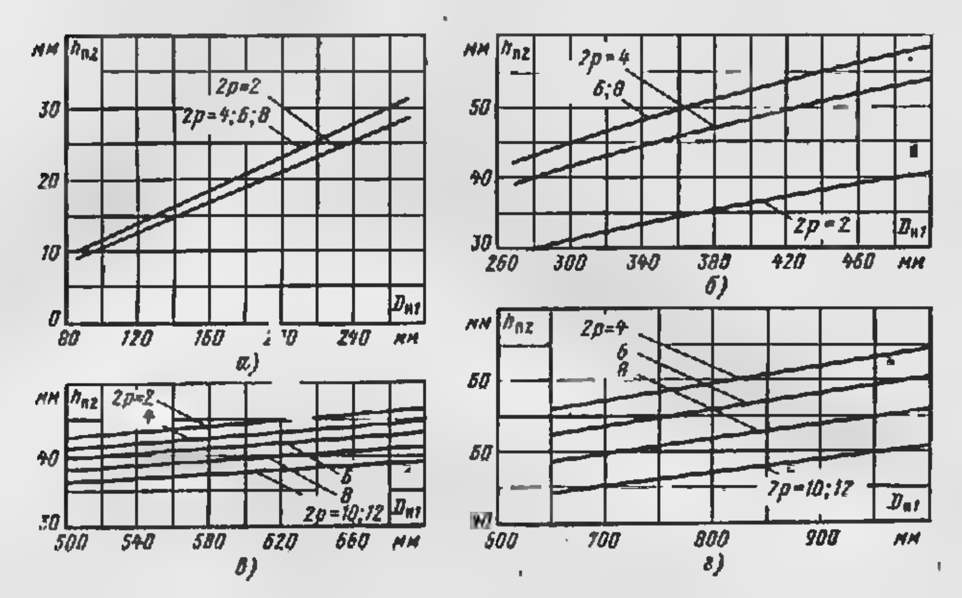


Рис. 14-13. Средние значения $h_{п2}=f(D_{н1})$ короткозамкнутого ротора.
а — $U \leqslant 660$ В, $D_{н1}=85\div270$ мм, б — то же, $D_{н1}=270\div500$ мм; в — то же, $D_{н1}=500\div700$ мм; г — $U=6000$ В, $D_{н1}=650\div1000$ мм.

Высоту паза $h_{п2}$ принимают из рис. 14-13,а—г и определяют при этом магнитную индукцию в спинке ротора, Т,

$$B_{c2} = \Phi \cdot 10^6 / 2 l_{эф2} h_{c2}, \qquad (14\text{-}56)$$

где Φ — из (14-17); $l_{эф2}=k_c l_2$, мм; k_c — из табл. 14-1.

Расчетная высота спинки ротора, мм,

при $2p=2$; 4

$$h_{c2} = \frac{2+p}{3{,}2p}\left(\frac{D_{н2}}{2} - h_{п2}\right) - \frac{2}{3} d_{к2}; \qquad (14\text{-}57)$$

при $2p \geqslant 6$

$$h_{c2} = \frac{D_{н2} - D_2}{2} - h_{п2} - \frac{2}{3} d_{к2}. \qquad (14\text{-}58)$$

Полученное значение B_{c2} сопоставляют с наибольшими допустимыми значениями по табл. 14-23.

Если магнитная индукция B_{c2} превышает допустимые значения, то следует соответственно уменьшить $h_{п2}$.

Меньший радиус, мм,

$$r_2=\frac{\pi(D_{н2}-2h_{п2})-Z_2 b_{з2}}{2(Z_2-\pi)}. \qquad (14\text{-}59)$$

Значение r_2 должно быть не менее 1 мм у двигателей с высотами оси вращения 50—132 мм и не менее 2 мм у двигателей с высотами оси вращения 160 мм и выше; в противном случае следует уменьшить ширину зубца $b_{з2}$ и повысить соответственно магнитную индукцию в зубцах $B_{з2}$.

Таблица 14-23

Наибольшие допустимые значения индукции в спинке ротора

U, В	Исполнение по степени защиты	Наибольшее значение индукции $B_{с2}$, Т						
		Ротор короткозамкнутый				Ротор фазный		
		2p=2	2p=4	2p=6	2p=8; 10; 12	2p=4	2p=6	2p=8; 10; 12
≤660	IP44	1,45	1,25	1,15	0,85	1,25	1,05	0,75
	IP23	1,55	1,35	1,25	0,95	1,35	1,15	0,85
6000	IP44	—	1,45	1,20	1,0	1,35	1,10	0,90
	IP23	—	1,55	1,30	1,10	1,45	1,20	1,0

Примечание. Для тихоходных двигателей с числами полюсов 10 и 12 значения индукции $B_{с2}$ могут быть существенно ниже приведенных в таблице.

Расстояние между центрами радиусов, мм,

$$h_1=h_{п2}-h_{ш}-h_2-r_1-r_2. \qquad (14\text{-}60)$$

Площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе, мм²,

$$q_{ст}=Q_{пз}=\frac{\pi}{2}(r_1^2+r_2^2)+(r_1+r_2)h_1. \qquad (14\text{-}61)$$

Для овального полузакрытого паза $b_{ш}=1{,}0$ мм (при $h=50\div100$ мм) и 1,5 мм (при $h=112\div132$ мм), для овального закрытого паза $b_{ш}=1{,}5$ мм.

в) Размеры бутылочных закрытых пазов ротора

Размеры и площадь поперечного сечения нижней части бутылочного закрытого паза (рис. 14-12,*в*) выбирают из условия обеспечения равновеликого поперечного сечения зубцов. Ширину зубца $b_{з.н2}$ в этом сечении с учетом принятой по табл. 14-22 магнитной индукции $B_{з.н2}$ определяют по (14-54). Больший радиус нижней части паза, мм,

$$r_1=\frac{\pi(D_{н2}-2h_{ш}-2h)-Z_2 b_{з.н2}}{2(Z_2+\pi)}; \qquad (14\text{-}62)$$

высоту $h_{ш}$ принимают равной 0,2—0,5 мм, а $h=15$ мм.

Высоту паза $h_{п2}$ принимают по рис. 14-13,*в* и определяют при этом магнитную индукцию $B_{с2}$ в спинке ротора по (14-56)—(14-58). Если полученное значение $B_{с2}$ превышает допустимые значения, то следует соответственно уменьшить $h_{п2}$.

Меньший радиус, мм,

$$r_2 = \frac{\pi(D_{н2} - 2h_{н2}) - Z_2 b_{з\,н2}}{2(Z_2 - \pi)}, \qquad (14\text{-}63)$$

Значение r_2 должно быть не менее 2 мм; в противном случае следует уменьшить ширину зубца $b_{з.н2}$, повысив соответственно магнитную индукцию в зубцах $B_{з.н2}$.

Расстояние между центрами радиусов, мм,

$$h_1 = h_{п2} - h_2 - h - r_1 - r_2. \qquad (14\text{-}64)$$

Площадь поперечного сечения нижней части стержня, мм^2,

$$q_{ст\,н} = \frac{\pi}{2}(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) h_1. \qquad (14\text{-}65)$$

Площадь поперечного сечения верхней части стержня, мм^2,

$$q_{ст.в} = b(h - 0{,}11b), \qquad (14\text{-}66)$$

где ширина верхней части стержня $b \approx (1 \div 1{,}25) r_1$, мм.

Таблица 14-24

Средние значения магнитной индукции в наименьшем сечении зубцов короткозамкнутого ротора с прямоугольными пазами

h, мм	$2p$	Магнитная индукция $B_{з2макс}$, Т, для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
400—560	4 6—12	1,50—1,70 1,45—1,60	1,60—1,80 1,55—1,70

Общая площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе, мм^2,

$$q_{ст} = Q_{п2} = q_{ст.н} + q_{ст.в}. \qquad (14\text{-}67)$$

г) Размеры прямоугольных открытых пазов ротора

Размеры прямоугольных открытых пазов ротора (рис. 14-12,г) определяют, исходя из допустимой магнитной индукции в наиболее узком месте зубцов.

Ширина зубца в наиболее узком месте, мм,

$$b_{з2мин} = t_2 B_\delta / B_{з2макс} k_c. \qquad (14\text{-}68)$$

Магнитная индукция в расчетном наименьшем сечении зубца $B_{з2макс}$ может быть принята из табл. 14-24.

При выборе значений магнитной индукции $B_{з2макс}$ следует учитывать примечание к табл. 14-12.

Высоту паза $h_{п2}$ принимают из рис. 14-13 и определяют при этом магнитную индукцию $B_{с2}$ в спинке ротора по (14-56)—(14-58). Если полученное значение $B_{с2}$ превышает допустимые значения, то следует соответственно уменьшить $h_{п2}$.

Ширина паза, мм,

$$b_{п2} = \pi(D_{н2} - 2h_{п2}) / Z_2 - b_{з2мин}. \qquad (14\text{-}69)$$

Размеры стержня по высоте и ширине, мм,

$$h_{ст}=h_{п2}-h_c-h_ш; \qquad (14\text{-}70)$$

$$b_{ст}=b_{п2}-b_c; \qquad (14\text{-}71)$$

здесь $h_ш=4$ мм.

Ближайшую стандартную высоту $h_{ст}$ и ширину $b_{ст}$, а также площадь поперечного сечения $q_{ст}$ стержня определяют из приложения 33.

Уточняют размеры паза, мм,

$$h_{п2}=h_{ст}+h_c+h_ш;$$

$$b_{п2}=b_{ст}+b_c,$$

при этом размеры $h_{п2}$ и $b_{п2}$ округляют до ближайшей большей десятой доли миллиметра.

Площадь поперечного сечения паза, мм²,

$$Q_{п2}=h_{п2}b_{п2}. \qquad (14\text{-}72)$$

Длина стержня, мм,

$$l_{ст}=l_2+2l_{л2}, \qquad (14\text{-}73)$$

где $l_{л2}$ — расчетная длина части стержня, выступающей из сердечника ротора; для сварной клетки $l_{л2}\approx 50$ мм.

Вылет лобовой части обмотки, мм,

$$l_{в2}=k_л l_{л2}+l_{кл}, \qquad (14\text{-}74)$$

где $k_л$ — коэффициент, учитывающий изгиб стержня (см. рис. 9-22), в среднем $k_л=0{,}9$; $l_{кл}$ — длина короткозамыкающего кольца из (14-79).

д) Размеры короткозамыкающего кольца

Поперечное сечение кольца литой клетки (рис. 14-14,*а*), мм²,

$$q_{кл}=(0{,}35\div 0{,}45)Z_2 q_{ст}/2p. \qquad (14\text{-}75)$$

Поперечное сечение кольца сварной клетки (рис. 14-14,*б*), мм²,

$$q_{кл}=0{,}4Z_2 q_{ст}/2p. \qquad (14\text{-}76)$$

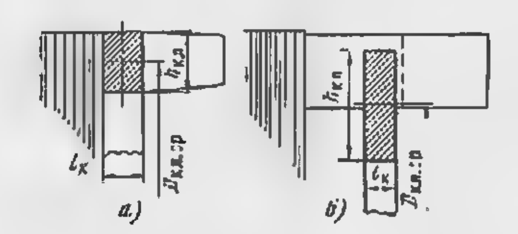


Рис. 14-14. Размеры короткозамыкающего кольца ротора.
а — литая клетка; *б* — сварная [redacted]

Высота кольца литой клетки, мм,

$$h_{кл}\approx(1{,}1\div 1{,}25)h_{п2}. \qquad (14\text{-}77)$$

Высота кольца сварной клетки, мм,

$$h_{кл}\approx 1{,}2h_{п2}. \qquad (14\text{-}78)$$

Длина кольца, мм,

$$l_{кл}=q_{кл}/h_{кл}. \qquad (14\text{-}79)$$

Средний диаметр кольца литой клетки, мм,

$$D_{кл.ср}=D_{п2}-h_{кл}. \quad (14\text{-}80)$$

Средний диаметр кольца сварной клетки, мм,

$$D_{кл.ср}=D_{п2}-2h_{ш}-h_{кл}-0{,}5h_{ст}. \quad (14\text{-}81)$$

14-5. ОБМОТКА ФАЗНОГО РОТОРА

а) Тип обмотки и формы пазов ротора

Как было указано в § 14-1, двигатели с фазным ротором при $h\geqslant 280$ мм относятся к основному исполнению серии; ниже приводится методика расчета таких машин. Двигатели с фазным ротором с высотами оси вращения $h\leqslant 280$ мм применяются реже, они являются модификацией основного исполнения двигателей с короткозамкнутым ротором.

Двухполюсные двигатели с фазным ротором в сериях не предусматриваются вследствие трудности выполнения обмотки и недостаточной надежности фазного ротора таких двигателей.

Таблица 14-25

Рекомендуемые значения q_2 двигателей с фазным ротором

h, мм	Значения q_2 при $2p$				
	4	6	8	10	12
280—355	6	4,5	3,5	4	3
400—560	6	5	4	4	3,5

В роторах двигателей с высотами оси вращения 280 мм и выше применяют двухслойную волновую обмотку из медных изолированных стержней прямоугольного поперечного сечения. В каждом пазу располагают по два стержня друг над другом, большей стороной по высоте паза. При сравнительно больших сечениях стержней (более 80—100 мм²) применяют два стержня, параллельно расположенные по ширине паза и изолируемые вместе. Стержни ротора имеют твердую изоляцию, выполняемую путем обкатки и прессовки (см. § 9-3).

Число пазов ротора

$$Z_2=6pq_2, \quad (14\text{-}82)$$

где q_2 — число пазов на полюс и фазу; рекомендуемые значения q_2 приведены в табл. 14-25; соответствующие рекомендуемым значениям q_2 числа пазов Z_2 приведены в табл. 14-2.

Обмотку выполняют без параллельных ветвей.

Число последовательно соединенных витков в обмотке фазы

$$w_2=2pq_2. \quad (14\text{-}83)$$

Число фаз обмотки ротора $m=3$. При q_2, равном целому числу, шаги секций с передней (со стороны выводов) и с задней стороны $y_{п2}$ и $y'_{п2}$ принимают равными $3q_2$, а шаг в конце обхода по окружности ротора укороченный: $y''_{п2}=3q_2-1$.

На рис. 14-15,*а* приведена схема обмотки фазы. Для выполнения обмотки фазы необходимо обойти q_2 раз окружность ротора в одном направлении, а затем q_2 раз в другом направлении. Таким образом получаются две ветви обмотки, имеющие одинаковые по значению и фазе э. д. с. и соединенные последовательно. Соединительные перемычки между ветвями обмотки обозначены *I—II*, *III—IV*, *V—VI*; выводы к контактным кольцам — *P1*, *P2*, *P3*.

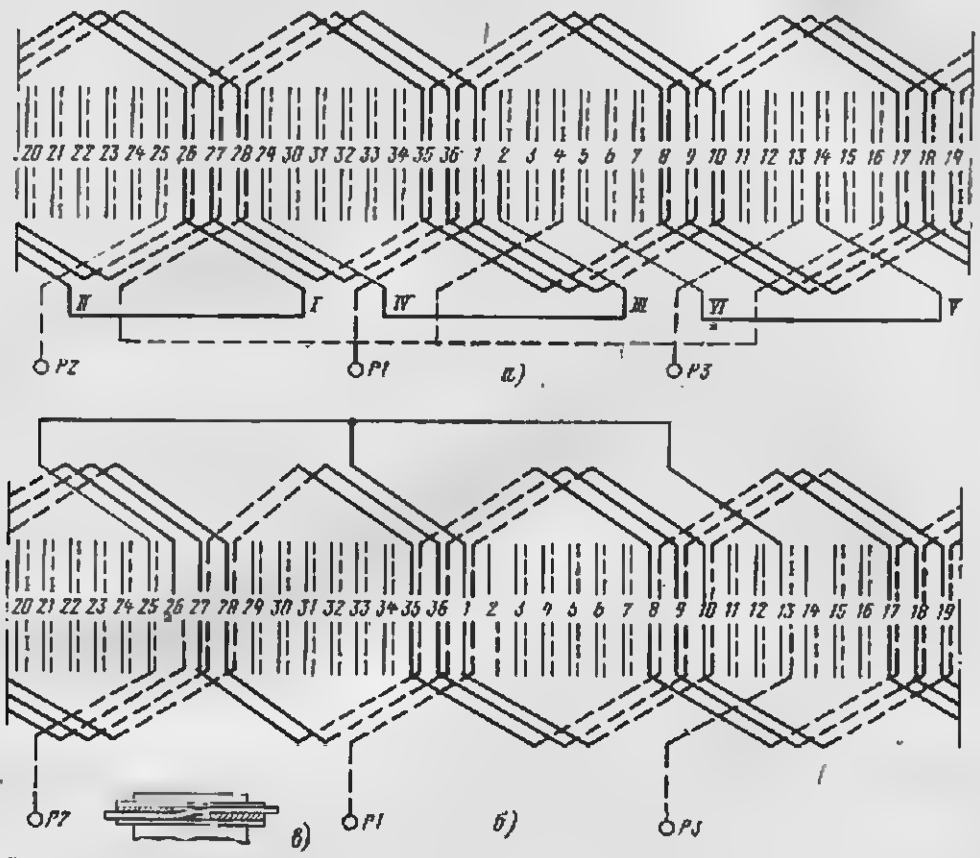


Рис. 14-15. Развернутые схемы двухслойной волновой обмотки фазного ротора при $Z_2=36$; $2p=4$; $q_2=3$; $a=1$.

а — схема с соединительными перемычками между обеими ветвями обмотки; *б* — схема без соединительных перемычек, с косыми стержнями; *в* — расположение косого стержня в пазу.

На рис. 14-15,*б* приведена схема волновой стержневой обмотки, отличающаяся от схемы, приведенной на рис. 14-15,*а*, тем, что в пазах *2*, *14* и *26* вместо двух стержней расположено по одному «косому» стержню (рис. 14-15,*в*), что устраняет необходимость перемычек *I—II*, *III—IV* и *V—VI* между ветвями обмотки; выводы к соединению звездой выполнены от стержней пазов *1*, *13* и *25* и расположены с задней стороны, что также упрощает изготовление обмотки. Паз с «косым» стержнем должен быть сдвинут относительно паза с начальным стержнем обмотки фазы на $2Z_2/3p-1$ пазов в обратном направлении хода обмотки. Например, для первой фазы (рис. 14-15,*б*) $2\cdot36/3\cdot2-1=11$; $36+1-11=26$ пазов.

Несмотря на некоторую несимметрию кривой м. д. с., эти обмотки нашли широкое применение в современных отечественных асинхронных двигателях с фазным ротором (например, с высотами оси вращения 280—355 мм).

При дробном q_2 (например, 3,5; 4,5, см. табл. 14-25) и числе фаз, равном трем, число пазов, приходящееся на полюс, составляет дробное число. При этом нормальный шаг обмотки не может точно равняться полюсному делению τ и быть диаметральным, а может быть либо укороченным, либо удлиненным. Каждая пара соседних шагов в сумме должна равняться 2τ, поэтому при дробном q_2 укороченный шаг чередуется с удлиненным, а числа стержней в фазных зонах одной и той же фазы в каждом слое поочередно равны $q_2-{}^1/_2$ и $q_2+{}^1/_2$. Шаг обмотки с передней стороны (со стороны выводов) $y_{п2}=3q_2+{}^1/_2$, с задней стороны $y'_{п2}=3q_2+{}^1/_2$, шаг в конце обхода (укороченный) $y''_{п2}=y'_{п2}-1=3q_2-{}^1/_2$. Обмотка с дробным q_2 считается обмоткой с укороченным шагом.

Таблица 14-26

Значения $k_{р2}$, $k_{у2}$ и $k_{об2}$ обмотки фазного ротора

q_2	$k_{р2}$	$\frac{Z_2}{2p}$	$y_{п2}$	β	$k_{у2}$	$k_{об2}$
3	0,960	9	9	1,0	1,0	0,960
3,5	0,959	10,5	10; 11	0,953	0,997	0,955
4	0,958	12	12	1,0	1,0	0,958
4,5	0,957	13,5	13; 14	0,960	0,998	0,955
5	0,957	15	15	1,0	1,0	0,957
6	0,957	18	18	1,0	1,0	0,957

Коэффициенты распределения обмотки ротора $k_{р2}$, укорочения $k_{у2}$ и обмоточный коэффициент $k_{об2}$ определяют так же, как для обмотки статора, по (14-7), (14-10), (14-11). Для рекомендуемых значений q_2 эти коэффициенты могут быть взяты из табл. 14-26.

Число эффективных витков в обмотке фазы

$$w_{эф2}=w_2 k_{об2}. \qquad (14\text{-}84)$$

Электродвижущая сила обмотки фазы, В,

$$E_2=k_e U_1/k_{тр}, \qquad (14\text{-}85)$$

где коэффициент трансформации э. д. с. и тока $k_{тр}=w_{эф1}/w_{эф2}$; k_e — по рис. 14-8.

Обмотку ротора соединяют в звезду; при этом напряжение на кольцах, В,

$$U_к=\sqrt{3}E_2. \qquad (14\text{-}86)$$

Современные двигатели с фазным ротором выполняют со щетками, постоянно налегающими на контактные кольца. Для уменьшения тока кольца и соответственно потерь в щеточном контакте и на трение щеток о кольца напряжение на кольцах $U_к$ должно быть достаточно большим, но не превышать 1200 В. Отношение напряжения к току кольца целесообразно принимать равным 0,6—2,5 (бо́льшие значения для бо́льших двигателей).

б) Размеры прямоугольных полузакрытых пазов и стержневых проводников обмотки ротора

Размеры прямоугольных полузакрытых пазов показаны на рис. 14-16. Зубцовое деление по наружному диаметру ротора t_2 определяют по (14-53), ширину зубца в наиболее узком месте $b_{з2мин}$ — по (14-68), причем в последнее уравнение подставляют значение $B_{з2макс}$ из табл. 14-27, а коэффициент k_c — из табл. 14-1. При предварительном выборе значений магнитной индукции $B_{з2макс}$ следует учитывать примечание к табл. 14-12.

Высоту паза $h_{п2}$ принимают из рис. 14-17 и определяют при этом магнитную индукцию B_{c2} в спинке ротора по (14-56)—(14-58). Если полученное значение B_{c2} превышает наибольшие допустимые значения, указанные в табл. 14-23, то следует соответственно уменьшить $h_{п2}$.

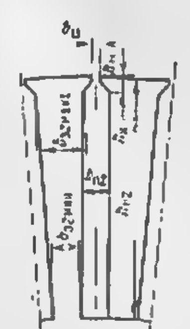


Рис. 14-16. Размеры прямоугольного полузакрытого паза фазного ротора

Ширина паза, мм,

$$b_{п2}=\pi(D_{н2}-2h_{п2})/Z_2-b_{з2мин}. \qquad (14\text{-}87)$$

Допустимые высота и ширина стержня, мм,

$$h=(h_{п2}-h_{и}-h_{к}-h_{ш}-h_{c})/2; \qquad (14\text{-}88)$$

$$b=b_{п2}-b_{и}-b_{c}. \qquad (14\text{-}89)$$

Здесь $h_{и}$, $b_{и}$ общая толщина изоляции в пазу ротора по высоте и ширине, включающая толщину изоляции стержня, размеры прокладок и припусков на укладку; значения $h_{и}$, $b_{и}$ указаны в табл. 14-28 в зависимости от напряжения на контактных кольцах; значение $h_{и}$ не учитывает высоты клина; $h_{к}=2{,}5$ мм при $h=280$ 355 мм и $h_{к}=3{,}5$ мм при $h=400\div560$ мм, $h_{ш}=1{,}0$ мм; h_c и b_c из табл. 14-3.

Ближайшие стандартные высоту и ширину, а также площадь поперечного сечения стержня q определяют из приложения 31. После

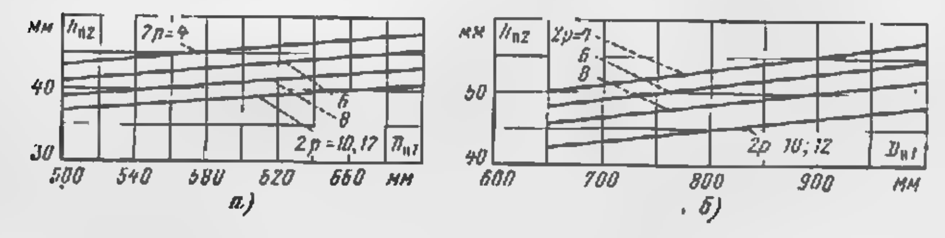


Рис. 14-17. Средние значения $h_{п2}=f(D_{н1})$ фазного ротора.
а — $U\leq660$ В, $D_{н1}=500\div700$ мм; б — $U=6000$ В, $D_{н1}=660\div1000$ мм.

установления окончательных размеров стержня уточняют размеры паза в штампе, мм, в соответствии с (14-88) и (14-89):

$$h_{п2}=2h+h_{и}+h_{к}+h_{ш}+h_{c};$$

$$b_{п2}=b+b_{и}+b_{c}.$$

Размеры $h_{п2}$ и $b_{п2}$ округляют до ближайшей большей десятой доли миллиметра.

Конструкция изоляции обмоток фазного ротора приведена в табл. 9-8.

Средняя ширина секции обмотки, мм,

$$b_{ср2}=t_{ср2}y_{п\,ср2}, \qquad (14\text{-}90)$$

где $t_{ср2}$ — среднее зубцовое деление ротора, мм,

$$t_{ср2}=\pi(D_{н2}-h_{п2})/Z_2;$$

$y_{п\,ср}$ — средний шаг секции по пазам, равный полусумме шагов с передней и задней стороны.

Таблица 14-27

Средние значения магнитной индукции в наименьшем сечении зубцов фазного ротора

h, мм	$2p$	Магнитная индукция $B_{z2\,макс}$, Т, для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
280—355	4 6—12	1,90—2,15 1,75—1,95	2,10—2,35 1,85—2,10
400—560	4 6—12	1,75—2,00 1,70—1,90	1,90—2,15 1,85—2,05

Таблица 14-28

Значения $h_п$ и $b_ш$ фазного ротора с полузакрытыми пазами

h, мм	$U_к$, В	$h_п$, мм	$b_ш$, мм
		при классах нагревостойкости изоляции B, F, H	
280—355 400—560	До 750 До 1200	4,5 7,1	1,6 3,0

Средняя длина лобовой части секции обмотки, мм:

при $U_к$ до 750 В

$$l_{л2}=\frac{b_{ср}}{\sqrt{1-[(b_{п2}+3,5)/t_2]^2}}+h_{п2}+50; \qquad (14\text{-}91)$$

при $U_к$ свыше 750 до 1200 В

$$l_{л2}=\frac{b_{ср}}{\sqrt{1-[(b_{п2}+5)/t_2]^2}}+h_{п2}+70. \qquad (14\text{-}92)$$

Средняя длина витка обмотки, мм,

$$l_{ср2}=2(l_2+l_{л2}). \qquad (14\text{-}93)$$

Вылет лобовой части обмотки, мм:

при $U_к$ до 750 В

$$l_{в2}=\frac{b_{ср}}{2}\frac{(b_{п2}+3,5)/t_2}{\sqrt{1-[(b_{п2}+3,5)/t_2]^2}}+\frac{h_{п2}}{2}+25; \qquad (14\text{-}94)$$

при $U_к$ свыше 750 до 1200 В

$$l_{в2}=\frac{b_{ср}}{2}\frac{(b_{п2}+5)/t_2}{\sqrt{1-[(b_{п2}+5)/t_2]^2}}+\frac{h_{п2}}{2}+35. \qquad (14\text{-}95)$$

14-6. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИГАТЕЛЯ

а) Активные и индуктивные сопротивления обмоток

Для определения к. п. д. и других параметров двигателя активные сопротивления обмоток статора и ротора приводят к расчетной рабочей температуре ϑ, указанной в ГОСТ 183-74, а именно к 75°С для обмоток с изоляцией класса В и к 115°С для обмоток с изоляцией классов F и Н. Удельное электрическое сопротивление материала проводников (медь, алюминий) при расчетной рабочей температуре, Ом·мкм,

$$\frac{1}{\gamma_\vartheta}=\frac{1}{\gamma_{20}}\left[1+\alpha\left(\vartheta-20^\circ\mathrm{C}\right)\right], \qquad (14\text{-}96)$$

где γ_{20} — удельная электрическая проводимость материала проводников при 20°С, См/мкм; α — температурный коэффициент сопротивления, °С$^{-1}$, равный для меди и алюминия примерно 0,004°С$^{-1}$; ϑ — расчетная рабочая температура, °С.

Таблица 14-29

Удельная электрическая проводимость материала проводников обмоток

Наименование	Материал	Удельная электрическая проводимость γ_ϑ, См/мкм, при температуре, °С		
		20	75	115
Обмотка статора и фазного ротора	Медь	57	47	41
Короткозамкнутый ротор	Алюминий	30	24	22
	Алюминиевые шины	35	28	26

Примечание. При заливке сердечника ротора алюминием в стержнях и короткозамыкающих кольцах остается некоторое количество воздушных включений; кроме того, алюминий приобретает в некотором роде волокнистую структуру (при заливке под давлением); в результате удельная электрическая проводимость литой клетки понижается примерно на 6—12%, поэтому для расчета сопротивления литой алюминиевой клетки принимают $\gamma_{75}=21{,}5$ См/мкм и $\gamma_{115}=20{,}5$ См/мкм.

Значения удельной проводимости меди и алюминия γ_{20} при температуре 20°С, при расчетной рабочей температуре 75 и 115°С (γ_{75} и γ_{115}) приведены в табл. 14-29.

При определении индуктивного сопротивления обмоток статора или ротора условно различают три основных вида полей рассеяния: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Для каждого из этих видов полей рассеяния определяют магнитную проводимость, затем суммируют эти проводимости и вычисляют индуктивное сопротивление обмотки.

Пазовое рассеяние обусловлено магнитным потоком, направленным поперек паза и сцепляющимся с расположенными в нем проводниками; оно зависит от формы и размеров паза. У двухслойных обмоток статора или фазного ротора при выполнении их с укороченным шагом в некоторых пазах располагаются катушки или стержни, принадлежащие разным фазам, в результате чего потокосцепление такой обмотки уменьшается; уменьшение пазового рассеяния учитывается введением в расчетные формулы коэффициентов k_β и k'_β, зависящих от укорочения шага β.

Поля рассеяния, особенно пазовое, вызывают в проводниках вихревые токи и неравномерное распределение тока по поперечному сечению проводников. В результате этого повышается активное сопротивление и уменьшается индуктивное сопротивление обмотки. Повышение активного сопротивления учитывается умножением его на коэффициент вытеснения тока $k_{в.т}$. При частоте 50 Гц и выполнении обмотки статора из проводников круглого поперечного сечения или из прямоугольных проводников вытеснением тока в проводниках можно пренебречь и считать для обмотки статора $k_{в.т}=1$. В короткозамкнутом роторе с достаточно глубокими пазами вытеснение тока необходимо учитывать при скольжении $s>0,2$, особенно в начальный момент пуска, когда $s=1$, а $f_2=f_1$. В рабочем режиме для короткозамкнутого ротора принимают $k_{в.т}=1$, так как частота f_2 при этом относительно мала.

В процессе пуска двигателя с короткозамкнутым ротором, включаемого обычно на номинальное напряжение сети, в его обмотках возникают большие токи, достигающие в начальный момент $(5 \div 7) I_н$. При этом увеличивается насыщение зубцов от полей рассеяния (особенно тех их частей, которые расположены близко к воздушному зазору). В результате этого уменьшаются индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора. При расчете параметров двигателя влияние насыщения на индуктивные сопротивления учитывают только при $I > 2I_н$.

Пуск двигателя с фазным ротором осуществляется при помощи реостата, включаемого последовательно с обмоткой ротора и имеющего такое сопротивление, чтобы ток в процессе пуска не превышал $(1,0 \div 1,5) I_н$, поэтому при определении параметров обмоток двигателя с фазным ротором не учитывают влияние на индуктивные сопротивления насыщения от полей рассеяния (за исключением индуктивных сопротивлений при определении $M_{макс}$). Не учитывают также влияние вытеснения тока на активное и индуктивное сопротивления обмотки фазного ротора, поскольку эти сопротивления малы в сравнении с сопротивлением пускового реостата.

б) Параметры обмотки статора

Активное сопротивление обмотки фазы, Ом,

$$r_1 = w_1 l_{ср1} / \gamma_\theta a_1 c q \cdot 10^6, \tag{14-97}$$

где γ_θ — удельная проводимость меди при расчетной рабочей температуре, принимается по данным табл. 14-29.

Активное сопротивление обмотки фазы, выраженное в относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 I_{1н} / U_1. \tag{14-98}$$

Коэффициент проводимости рассеяния пазов:
трапецеидального полузакрытого (рис. 14-18,*а*)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_1} + \frac{3h_к}{b_1 + 2b_ш} + \frac{h_ш}{b_ш} \right) k'_\beta; \tag{14-99}$$

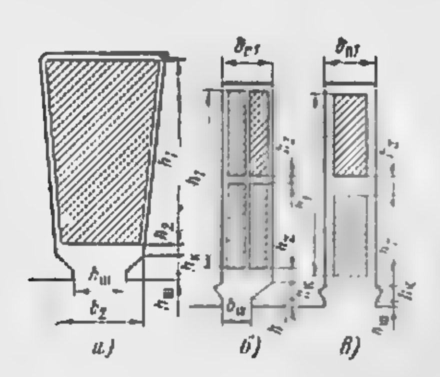
прямоугольного полуоткрытого (рис. 14-18, *б*)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1 - h_3}{3b_п} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_п} + \frac{3h_к}{b_п + 2b_ш} + \frac{h_ш}{b_ш} \right) k'_\beta + \frac{h_3}{4b_п}; \tag{14-100}$$

прямоугольного открытого (рис. 14-18, *в*)

$$\lambda_{п1}=\frac{h_1-h_3}{3b_{п1}}k_\beta+\frac{h_2+h_к+h_ш}{b_{п1}}k'_\beta+\frac{h_3}{4b_{п1}}. \qquad (14\text{-}101)$$

Здесь k_β и k'_β — коэффициенты, значения которых принимают по рис. 14-19. Для однослойных обмоток с диаметральным шагом $k_\beta=k'_\beta=1$. Проводимость дифференциального рассеяния, которая обусловлена высшими гармоническими, определяют без учета насыщения. Высшие гармоники поля статора наводят токи в обмотке ротора; демпфирующую реакцию этих токов учитывают только при короткозамкнутом роторе. При этом скос пазов уменьшает демпфирующую реакцию токов.



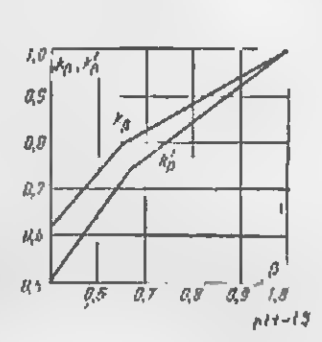


Рис. 14-18. Размеры паза статора с обмоткой (к определению коэффициента проводимости рассеяния пазов).

а — трапецеидального полузакрытого, *б* — прямоугольного полуоткрытого; *в* — прямоугольного открытого.

Рис. 14-19. Коэффициенты k_β и $k'_\beta=f(\beta)$.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния статора

$$\lambda_{д1}=0,9\,(t_1k_{об1})^2\,k_{р1}k_{ш1}k_{д1}/\delta k_\delta, \qquad (14\text{-}102)$$

где $k_{р1}$ — коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наведенных в обмотке короткозамкнутого ротора высшими гармониками поля статора; $k_{ш1}$ — коэффициент, учитывающий дополнительно к k_δ влияние открытия пазов статора на проводимость дифференциального рассеяния; $k_{д1}$ — коэффициент дифференциального рассеяния статора, равный отношению суммы э. д. с., наведенных высшими гармониками поля статора, к э. д. с., наведенной 1-й гармоникой того же поля.

Значения коэффициента $k_{р1}$ приведены в табл. 14-30 (в соответствии с рекомендуемыми числами пазов Z_1/Z_2 из табл. 14-2) для двигателей со скосом и без скоса пазов; для двигателей с фазным ротором $k_{р1}=1$. Значения k_δ определяют по (14-156)—(14-158).

Коэффициент $k_{ш1}$ вычисляют по формуле

$$k_{ш1}=1-0,033b^2_ш/t_1\delta, \qquad (14\text{-}103)$$

где $b_ш$ — ширина шлица паза статора, мм.

Значения коэффициента $k_{д1}$ приведены в табл. 14-31.

Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки

$$\lambda_{л1} = 0{,}34\, \frac{q_1}{l_1} (l_{л1} - 0{,}64\beta\tau). \qquad (14\text{-}104)$$

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}. \qquad (14\text{-}105)$$

Таблица 14-30

Значения коэффициента $k_{р1}$

q_1	Коэффициент $k_{р1}$ при Z_1/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99/0,94	0,94/0,87	—	—	—	—	—
3	0,98/0,92	0,93/0,87	0,88/0,84	0,85/0,78	—	—	—
4	—	0,90/0,81	0,84/0,77	0,80/0,76	0,77/0,72	—	—
5	—	—	—	0,75/0,69	0,72/0,67	0,70/0,65	—
6	—	—	—	0,70/0,62	0,66/0,60	0,62/0,58	—
8	—	—	—	—	—	0,53/0,47	0,51/0,46

Примечания: 1. В числителе указаны значения, относящиеся к двигателям, имеющим скос пазов при $b_c \approx t_2$, а в знаменателе — к двигателям, не имеющим скоса пазов.

2. Для дробных значений q_1 и для значений Z_1/p, отличающихся от указанных в таблице, коэффициент $k_{р1}$ следует определять интерполяцией.

Таблица 14-31

Значения коэффициента $k_{д1}$

q_1	Двухслойная обмотка с укороченным шагом			Однослойная обмотка с диаметральным шагом
	β	$k_{д1}$ двигателя с ротором		
		короткозамкнутым	фазным	$k_{д1}$
1,5	0,890	0,045	0,0470	—
2	0,833	0,0235	0,0235	0,0285
2,5	0,800	0,0170	0,0180	—
3	0,778	0,0111	0,0111	0,0141
4	0,833	0,0062	0,0062	0,0089
5	0,800	0,0043	0,0043	0,0065
6	0,833	0,0030	0,0030	0,0052
8	0,792	0,0021	0,0021	—

Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора, Ом,

$$x_1 = \frac{1{,}58 f_1 l_1 w_1^2}{p q_1 \cdot 10^8} \lambda_1, \qquad (14\text{-}106)$$

в относительных единицах

$$x_{1*} = x_1 I_{1н} / U_1. \qquad (14\text{-}107)$$

в) Параметры обмотки короткозамкнутого ротора

Ротор с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами и литой клеткой (рис. 14-12,а, б)

Активное сопротивление стержня клетки, Ом,

$$r_{ст} = \frac{l_2}{\gamma_\vartheta q_{ст} \cdot 10^3} k_{в.т}, \qquad (14\text{-}108)$$

где γ_ϑ — удельная проводимость алюминия при расчетной рабочей температуре, См/мкм, принята по табл. 14-29 (с учетом примечания); $k_{в.т}$ — коэффициент вытеснения тока при частоте $f_2 = sf_1$, зависит от значения ξ, характеризующего степень повышения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений клетки ротора.

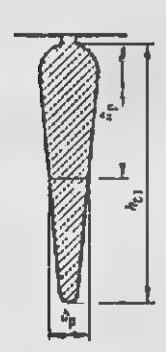


Рис. 14-20. Размеры овального паза короткозамкнутого ротора с обмоткой (к определению коэффициента проводимости рассеяния).

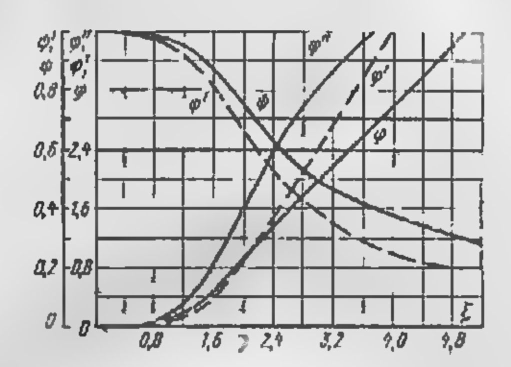


Рис. 14-21. Коэффициенты ψ и $\varphi = f(\xi)$.

Коэффициент $k_{в.т}$ определяют в следующем порядке:

$$\xi = 0{,}002 h_{ст} \sqrt{(b_{ст}/b_{п2})} \sqrt{\gamma_\vartheta} \sqrt{sf_1}, \qquad (14\text{-}109)$$

где $h_{ст}$ — высота стержня клетки ротора (рис. 14-20), мм; при полузакрытых пазах $h_{ст} = h_{п2} - h_{ш}$, при закрытых $h_{ст} = h_{п2} - h_2 - h_{ш}$; $b_{ст}$, $b_{п2}$ — ширина стержня, мм, и ширина паза, мм; для литой алюминиевой клетки $b_{ст}/b_{п2} = 1$.

При $f_1 = 50$ Гц и удельной проводимости алюминия $\gamma_{75} = 21{,}5$ и $\gamma_{115} = 20{,}5$ См/мкм (см. примечание к табл. 14-29); значение ξ будет соответственно равно:

$$\left.\begin{aligned} \xi_{75} &= 0{,}066 h_{ст} \sqrt{s}; \\ \xi_{115} &= 0{,}064 h_{ст} \sqrt{s}. \end{aligned}\right\} \qquad (14\text{-}110)$$

Расчетная глубина проникновения тока в стержень (рис. 14-20), мм,

$$h_р = h_{ст}/(1+\varphi), \qquad (14\text{-}111)$$

где коэффициент $\varphi = f(\xi)$ определяют из рис. 14-21.

Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока (см. также рис. 14-12,а, б), мм:

при $r_1 \leq h_р \leq r_1 + h_1$

$$b_р = 2r_1 - \frac{2(r_1 - r_2)}{h_1}(h_р - r_1); \qquad (14\text{-}112)$$

при $h_р < r_1$, что может иметь место при $s > 1$ (режим электромагнитного тормоза),

$$b_р = 2\sqrt{r_1^2 - (r_1 - h_р)^2}. \qquad (14\text{-}112а)$$

Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока, мм^2:

при $r_1 \leq h_р \leq r_1 + h_1$

$$q_р = \frac{\pi}{2} r_1^2 + \left(r_1 + \frac{b_р}{2}\right)(h_р - r_1); \qquad (14\text{-}113)$$

при $h_р < r_1$

$$q_р \approx \frac{r_1\left(\sqrt{b_р^2 + 5{,}33h_р^2} - b_р\right) + b_р h_р}{2}. \qquad (14\text{-}113а)$$

Коэффициент вытеснения тока

$$k_{в.т} = q_{ст}/q_р. \qquad (14\text{-}114)$$

Если $h_р > h_1 + r_1$, то $k_{в.т} \approx 1$.

Расчет $k_{в.т}$ производят только в том случае, если для алюминиевого стержня $\xi \geq 1$. Для рабочего режима $k_{в.т} = 1$.

Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, Ом,

$$r_{кл} = \frac{2\pi D_{кл.ср}}{Z_2 \gamma_\theta q_{кл} k_{пр2}^2 \cdot 10^3}, \qquad (14\text{-}115)$$

где $k_{пр2}$ — коэффициент приведения тока кольца к току стержня,

$$k_{пр2} = 2\sin(\pi p/Z_2); \qquad (14\text{-}116)$$

при $Z_2/2p \geq 6$ коэффициент $k_{пр2} \approx 2\pi p/Z_2$, тогда

$$r_{кл} = \frac{D_{кл.ср}}{\gamma_\theta p q_{кл} k_{пр2} \cdot 10^3}.$$

Коэффициент скоса пазов ротора

$$k_{ск} = 2\sin(\alpha_{ск}/2)/\alpha_{ск}, \qquad (14\text{-}117)$$

где $\alpha_{ск}$ — центральный угол скоса пазов, рад,

$$\alpha_{ск} = \pi \frac{2p}{Z_2} \beta_{ск},$$

здесь $\beta_{ск}$ — скос пазов, выраженный в долях зубцового деления t_2.

Значения

$\alpha_{ск}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$k_{ск}$	1,0	1,0	0,999	0,998	0,995	0,991	0,986	0,980	0,974	0,967

Вычисленные значения коэффициентов скоса в зависимости от $\alpha_{ск}$ приведены в табл. 14-32.

При скосе пазов ротора на одно зубцовое деление статора $\alpha_{ск}=\pi 2p/Z_1$; при указанном скосе для двигателей с $2p=2$ принимают $k_{ск}=1$.

Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора

$$k_{пр1}=\frac{4m_1}{Z_2}\left(\frac{w_{эф1}}{k_{ск}}\right)^2. \qquad (14\text{-}118)$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом,

$$r'_2=k_{пр1}(r_{ст}+r_{кл}); \qquad (14\text{-}119)$$

в относительных единицах

$$r'_{2*}=r'_2 I_{1н}/U_1. \qquad (14\text{-}120)$$

Коэффициент проводимости рассеяния пазов:

овального полузакрытого (рис. 14-12, *а*)

$$\lambda_{п2}=\left[\frac{h_1+0{,}8r_2}{6r_1}\left(1-\frac{\pi r_1^2}{2q_{ст}}\right)^2+0{,}66-\frac{b_ш}{4r_1}\right]\psi+\frac{h_ш}{b_ш}; \qquad (14\text{-}121)$$

овального закрытого (рис. 14-12, *б*)

$$\lambda_{п2}=\left[\frac{h_1+0{,}8r_2}{6r_1}\left(1-\frac{\pi r_1^2}{2q_{ст}}\right)^2+0{,}66-\frac{b_ш}{4r_1}\right]\psi+0{,}3+1{,}12\frac{h_ш\cdot 10^{3}}{I_2}, \qquad (14\text{-}122)$$

где ψ — коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока; $\psi=f(\xi)$ определяют по рис. 14-21. Для рабочего режима $\psi=1$.

Для рабочего режима значение тока стержня ротора, А, подставляемое в (14-122),

$$I_2=\frac{2w_{эф1}P_1(0{,}2+0{,}8\cos\varphi)}{U_1 Z_2}. \qquad (14\text{-}123)$$

Здесь значения P_1 и $\cos\varphi$ соответствуют принятым в § 14-2.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д2}=\frac{0{,}9t_2(Z_2/6p)^2 k_{д2}}{\delta k_\delta}, \qquad (14\text{-}124)$$

где $k_{д2}$ — коэффициент дифференциального рассеяния ротора определяют по рис. 14-22 при $q_2=Z_2/3\cdot 2p$.

Таблица 14-32

$k_{ск}=f(\alpha_{ск})$

1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
0,959	0,951	0,942	0,932	0,921	0,909	0,897	0,884	0,870	0,856

Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки

$$\lambda_{кл}=\frac{2,3D_{кл.ср}}{Z_2 l_2 k^2_{пр2}}\lg\frac{4,7D_{кл.ср}}{2h_{кл}+2l_{кл}},\qquad(14\text{-}125)$$

где $k_{пр2}$ определяют по (14-116), $l_{кл}$ — по (14-79).

Коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов

$$\lambda_{ск}=\frac{t_2\beta^2_{ск}}{9,5\delta k_\delta k_{\mu\, ц}},\qquad(14\text{-}126)$$

где $\beta_{ск}$ — скос пазов в долях зубцового деления ротора.

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора

$$\lambda_2=\lambda_{п2}+\lambda_{д2}+\lambda_{кл}+\lambda_{ск}.\qquad(14\text{-}127)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом,

$$x_2=7,9f_1 l_2\lambda_2\cdot 10^{-6}.\qquad(14\text{-}128)$$

Рис. 14-22. Коэффициент $k_{д2}=f(q_2)$.

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом,

$$x'_2=k_{пр1}x_2,\qquad(14\text{-}129)$$

где $k_{пр1}$ определяют по (14-118); в относительных единицах

$$x'_{2*}=x'_2 I_{1н}/U_1.\qquad(14\text{-}129а)$$

Ротор с бутылочными закрытыми пазами и литой клеткой (рис. 14-12,в)

Для короткозамкнутых роторов двигателей с высотами оси вращения $h=250$ мм при $2p=2$ и с $h=280\div355$ мм при $2p=2$, 4, 6 и 8 целесообразно применять бутылочные пазы с заливкой алюминием, выполняемые в соответствии с § 14-1 без скоса. Высоту верхней части паза h обычно выбирают равной приблизительно 15 мм; при этом при $f_2=50$ Гц $\xi\leqslant1$ и вытеснение тока в этой части стержня как от собственного поля пазового рассеяния, так и от поля взаимной индукции пазового рассеяния нижней части стержня не учитывают. Для нижней части стержня вытеснение тока учитывается только в том случае, если приведенная высота этой части стержня $\xi>1$.

Активное сопротивление верхней части стержня, Ом,

$$r_{ст.в}=l_2/\gamma_9 q_{ст.в}\cdot 10^3.\qquad(14\text{-}130)$$

Активное сопротивление нижней части стержня, Ом,

$$r_{ст.н}=\frac{l_2}{\gamma_9 q_{ст.н}\cdot 10^3}k_{в.т.н},\qquad(14\text{-}131)$$

где $k_{в.т.н}$ — коэффициент вытеснения тока в нижней части стержня.

Коэффициент $k_{в.т.н}$ больше 1 в тех случаях, когда глубина проникновения тока в стержень бутылочного паза $h_р$, найденная по (14-111)

при $h_{ст}=h_{п2}-h_2$, превышает значение h (см. рис. 14-12,в). Это обычно имеет место при значениях скольжения $0,2<s\leq 1$. В этих случаях коэффициент $k_{в.т.н}$ определяют так же, как для ротора с простыми овальными пазами и литой клеткой в следующем порядке.

Рассчитывают глубину проникновения тока в нижнюю часть стержня $h_{р.н}$, мм,

$$h_{р.н}=h_р-h. \qquad (14\text{-}132)$$

Определяют ширину нижней части стержня $b_{р.н}$ и площадь поперечного сечения $q_{р.н}$, соответствующие глубине проникновения тока $h_{р.н}$, по (14-112), (14-112а) и по (14-113), (14-113а) с заменой $h_р$, $b_ф$ и $q_р$ соответственно на $h_{р.н}$, $b_{ф.н}$ и $q_{р.н}$. Затем рассчитывают коэффициент $k_{в.т.н}$ по (14-114) с заменой $k_{в.т}$, $q_{ст}$ и $q_р$ соответственно $k_{в.т.н}$, $q_{ст.н}$ и $q_{р.н}$.

Активное сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня $r_{кл}$, определяют по (14-115).

Активное сопротивление верхней части клетки, приведенное к статору, Ом,

$$r'_в=k_{пр1}r_{ст.в}, \qquad (14\text{-}133)$$

где $k_{пр1}$ определяют по (14-118).

Активное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору, Ом,

$$r'_н=k_{пр1}r_{ст.н}. \qquad (14\text{-}134)$$

Активное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору, Ом,

$$r'_о=k_{пр1}r_{кл}. \qquad (14\text{-}135)$$

Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки

$$\lambda_{2н}=\lambda_{п н}=\left[\frac{h_1+0,8r_2}{6r_1}\left(1-\frac{\pi r_1^2}{2q_{ст н}}\right)^2+0,66-\frac{b}{4r_1}\right]\psi''+\frac{h-0,18}{2b}. \qquad (14\text{-}136)$$

Здесь ψ'' — коэффициент, характеризующий уменьшение проводимости пазового рассеяния нижней клетки вследствие вытеснения тока,

$$\psi''=h_{хн}/(h_{п2}-h_2-h), \qquad (14\text{-}136а)$$

где $h_{хн}=(h_{п2}-h_2)\psi-h$.

Коэффициент ψ определяют из рис. 14-21 в зависимости от значения ξ, рассчитанного для всей высоты стержня; при $\xi\leq 1$ $\psi''\approx 1$.

Коэффициент проводимости рассеяния взаимной индукции нижнего и верхнего пазов

$$\lambda_{н в}=\frac{h-0,1b}{2b}+1,09+1,12\frac{h^2}{I_2}10^3, \qquad (14\text{-}137)$$

где I_2 — суммарный ток верхней и нижней частей стержня, А; приближенное значение I_2 для расчета рабочего режима определяют по (14-123).

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{д2}$ рассчитывают по (14-124).

Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец $\lambda_{кл}$ определяют по (14-125).

Коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора

$$\lambda_{2о}=\lambda_{п.в}+\lambda_{д2}+\lambda_{кл}. \quad (14\text{-}138)$$

Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору, Ом,

$$x'_н=x_1\lambda'_{2н}/\lambda_1, \quad (14\text{-}139)$$

где $\lambda_{2н}$ — приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки,

$$\lambda'_{2н}=\lambda_{2н}\frac{l_2 Z_1}{l_1 Z_2}k^2_{.об1}.$$

Индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведённое к статору, Ом,

$$x'_о=x_1\lambda'_{2о}/\lambda_1, \quad (14\text{-}140)$$

где $\lambda'_{2о}$ — приведенный коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора,

$$\lambda'_{2о}=\lambda_{2о}\frac{l_2 Z_1}{l_1 Z_2}k_{об1}.$$

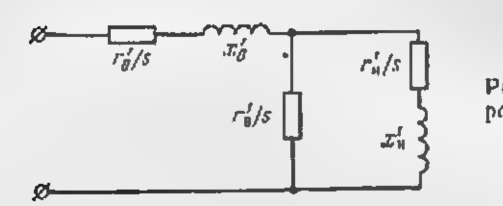


Рис. 14-23. Схема замещения ротора с бутылочными пазами или с двойной клеткой.

Результирующие сопротивления ротора, приведенные к статору, определяются в соответствии со схемой замещения (рис. 14-23).

Активное результирующее сопротивление, Ом,

$$r'_2=r'_о+r'_н\theta_д, \quad (14\text{-}141)$$

где $\theta_д=r'_в/(r'_в+r'_н)$; при $s=1$ $r'_2=r'_о+r'_в$.

Индуктивное результирующее сопротивление, Ом,

$$x'_2=x'_о+x'_н\theta^2_x, \quad (14\text{-}142)$$

где $\theta_x=q_{хн}/(q_{хн}+q_{от.в})$.

Значение $q_{хн}$ определяют по (14-112)—(14-112а) и (14-113)—(14-113а) с заменой $h_р$, $b_р$ и $q_р$ соответственно на $h_{хн}$, $b_{хн}$ и $q_{хн}$; в рабочем режиме $\theta_x=\theta_д$.

Ротор с прямоугольными открытыми пазами и сварной клеткой (рис. 14-12,г).

Активное сопротивление стержня клетки определяют по (14-108) с добавлением сопротивления лобовых частей стержня, Ом,

$$r_{ст.л}=\frac{l_{ст}-l_2}{\gamma_\theta q_{ст}\cdot 10^3}.$$

Для рабочего режима в (14-108) $k_{вт}=1$; для других режимов работы ξ определяют по (14-109), принимая отношение $b_{ст}/b_{п2}=0{,}9$, при учете припуска на сборку сердечника b_0 (по табл. 14-3) и некоторого

зазора на укладку стержней. Для сварной алюминиевой клетки при $\gamma_{75}=24$ и $\gamma_{115}=22{,}0$ См/мкм (табл. 14-29) и при $f_1=50$ Гц выражения (14-110) справедливы.

Коэффициент вытеснения тока

$$k_{в.т}=1+\frac{l_2-n_к l_к}{l_2}\varphi, \qquad (14\text{-}143)$$

где коэффициент $\varphi=f(\xi)$ определяют из рис. 14-21; значения $r_{кл}$, $k_{пр2}$, $k_{пр1}$, r'_2, r'_{2*} определяют по (14-115), (14-116), (14-118)—(14-120), принимая при этом $k_{ск}=1$.

Коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного открытого паза (рис. 14-12,г)

$$\lambda_{п2}=\frac{h_{п2}-h_{ш}}{3b_{п2}}\psi+\frac{h_{ш}}{b_{п2}}, \qquad (14\text{-}144)$$

где ψ — коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока; $\psi=f(\xi)$ определяют по рис. 14-21. Для рабочего режима $\psi=1$.

Проводимость дифференциального рассеяния $\lambda_{д2}$ определяют по (14-124); проводимость рассеяния короткозамыкающих колец сварной клетки $\lambda_{кл}$ — по (14-125).

Полную проводимость рассеяния обмотки ротора определяют по (14-127), принимая $\lambda_{ск}=0$, так как двигатели с высотами оси вращения свыше 160 мм выполняют без скоса пазов.

Значения x_2, x'_2 и x'_{2*} определяют по (14-128)—(14-130).

г) Параметры фазного ротора

Активное сопротивление обмотки фазы ротора, Ом,

$$r_2=w_2 l_{cp2}/\gamma_\vartheta q a_2\cdot 10^3, \qquad (14\text{-}145)$$

где γ_ϑ определяют по табл. 14-29.

Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора, Ом,

$$r'_2=k_{пр1}r_2, \qquad (14\text{-}146)$$

где $k_{пр1}=(w_{эф1}/w_{эф2})^2$; в относительных единицах

$$r'_{2*}=r'_2 I_{1н}/U_1. \qquad (14\text{-}147)$$

Коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного полузакрытого паза $\lambda_{п2}$ определяют по (14-100) с заменой в формуле $b_{п1}$ на $b_{п2}$ и в соответствии с размерами на рис. 14-24.

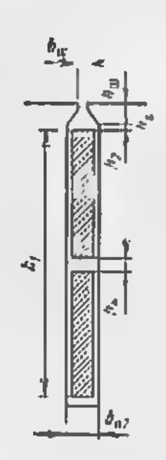


Рис. 14-24. Размеры прямоугольного полузакрытого паза фазного ротора (к определению коэффициента проводимости рассеяния).

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д2}=0{,}9t_2(q_2k_{об2})^2k_{ш2}k_{д2}/\delta k_\delta, \qquad (14\text{-}148)$$

где $k_{ш2}$ — коэффициент, учитывающий дополнительно к k_δ влияние открытия пазов ротора на проводимость дифференциального рассеяния,

$$k_{ш2}=1-\frac{0{,}033b^2_{ш}}{t_2\delta}; \qquad (14\text{-}149)$$

здесь $b_ш$ — ширина шлица ротора; $k_{д2}$ — коэффициент дифференциального рассеяния принимается из табл. 14-33.

Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки

$$\lambda_{л2} = 0,34 \frac{q_2}{l_2} (l_{л2} - 0,64\beta\tau). \qquad (14\text{-}150)$$

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}. \qquad (14\text{-}151)$$

Таблица 14-33

Значения коэффициента $k_{д2}$ для фазного ротора

q_2	3	3,5	4	4,5	5	6
$k_{д2}$	0,0111	0,0079	0,0062	0,0051	0,0043	0,0030

Индуктивное сопротивление обмотки фазы ротора, Ом,

$$x_2 = \frac{1,58 f_1 l_2 w_2^2}{p q_2 \cdot 10^4} \lambda_2. \qquad (14\text{-}152)$$

Индуктивное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора, Ом,

$$x'_2 = k_{пр1} x_2; \qquad (14\text{-}153)$$

в относительных единицах

$$x'_{2*} = x'_2 I_{1н} / U_1. \qquad (14\text{-}154)$$

14-7. НАМАГНИЧИВАЮЩИЙ ТОК

а) Магнитная цепь двигателя

Магнитная цепь асинхронного двигателя, как и других вращающихся электрических машин, симметрична; поэтому достаточно проводить расчет намагничивающего тока для одной пары полюсов двигателя.

Магнитную цепь двигателя можно рассматривать как состоящую из пяти однородных участков, соединенных последовательно: воздушный зазор, зубцы статора, зубцы ротора, спинка статора и спинка ротора. При расчете м. д. с. принимают для каждого участка равномерное распределение индукции.

Ход расчета заключается в определении для каждого участка его размеров и площади поперечного сечения, магнитной индукции, напряженности поля, расчетной средней длины магнитной силовой линии, магнитного напряжения участка, затем рассчитывают суммарную м. д. с. и намагничивающий ток.

Значения магнитной индукции на отдельных участках должны находиться в целесообразных пределах, так как увеличение магнитной индукции не только повышает намагничивающий ток и понижает коэффициент мощности двигателя, но и увеличивает магнитные потери, особенно в зубцах и спинке статора; малые значения магнитной индукции

понижают использование активных материалов двигателя, увеличивают его массу.

Кривая поля вследствие насыщения магнитной цепи уплощается, что учитывается коэффициентами α_δ и k_Φ. Расчет магнитной цепи ведется по основной волне потока; в соответствии с этим магнитная индукция B_δ является амплитудой основной волны. Учет уплощения при расчете магнитного напряжения зубцов производится по методу, предложенному Ф. Пунга [Л. 22], со следующим отличием: Ф. Пунга предполагал, что пересечение действительной кривой поля в зазоре с первой гармонической этой кривой происходит в точках, отстоящих на 30° электрического угла от оси кривой. Между тем расчеты [Л. 26] показывают, что указанный угол следует принимать равным 35°.

Расчет намагничивающего тока ведется только для номинального режима работы двигателя.

б) Воздушный зазор

Магнитное напряжение воздушного зазора на один полюс, А,

$$F_\delta = 0{,}08\delta k_\delta B_\delta \cdot 10^4, \tag{14-155}$$

где k_δ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние на магнитное сопротивление зазора зубчатости статора и ротора, наличия радиальных вентиляционных каналов.

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_\text{к}, \tag{14-156}$$

где $k_{\delta 1}$, $k_{\delta 2}$ — коэффициенты, учитывающие соответственно зубчатость статора и ротора; $k_\text{к}$ — коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления зазора вследствие ответвления части магнитного потока в радиальные каналы.

При полузакрытых и полуоткрытых пазах статора и полузакрытых пазах ротора

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_\text{ш}}{t_1 - b_\text{ш} + \frac{5\delta t_1}{b_\text{ш}}}; \tag{14-157}$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_\text{ш}}{t_2 - b_\text{ш} + \frac{5\delta t_2}{b_\text{ш}}}; \tag{14-158}$$

в (14-157) подставляют $b_\text{ш}$ паза статора, а в (14-158) — $b_\text{ш}$ паза ротора.

При открытых пазах статора и ротора $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ вычисляют по указанным выше формулам с подстановкой вместо ширины щели $b_\text{ш}$ — ширины паза, соответственно $b_{\text{п}1}$ и $b_{\text{п}2}$.

При наличии радиальных вентиляционных каналов на одной части двигателя (на статоре или на роторе)

$$k_\text{к} = 1 - \frac{3\delta}{l_\text{п} + 3\delta\,(1 + l_\text{п}/l_\text{к})}. \tag{14-159}$$

При совпадающих каналах на обоих частях двигателя (на статоре и на роторе)

$$k_{\text{к}} = 1 - \frac{1,5\delta}{l_{\text{п}} + 1,5\delta\,(1 + l_{\text{п}}/l_{\text{к}})}. \qquad (4\text{-}160)$$

в) Зубцы статора

Трапецеидальные полузакрытые пазы (рис. 14-10,а)

Магнитная индукция в равновеликом поперечном сечении зубца $B_{з1}$ определяется из (14-23). Напряженность магнитного поля в зубце $H_{з1}$ при $B_{з1} \leqslant 1,8$ Т определяют по приложениям 18—20 в зависимости от принятой марки стали; при $B_{з1} > 1,8$ Т — по приложению 24 или 25, в зависимости от принятой марки стали и коэффициента $k_з$, учитывающего ответвление части магнитного потока в паз статора. Коэффициент $k_з$ определяют на $^1/_3$ высоты зубца, считая от наиболее узкой части паза:

$$k_{з(1/3)} = t_{1(1/3)}/b_{з1}k_{\text{с}}, \qquad (14\text{-}161)$$

где $t_{1(1/3)} = \pi\,(D_1 + {}^2/_3 h_{\text{п1}})/Z_1$.

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце, мм,

$$L_{з1} = h_{\text{п1}}. \qquad (14\text{-}162)$$

Магнитное напряжение зубцов статора, А,

$$F_{з1} = 0,1 H_{з1} L_{з1}. \qquad (14\text{-}163)$$

Прямоугольные полуоткрытые и открытые пазы (рис. 14-10,б и в)

Магнитная индукция в расчетном наименьшем сечении зубца $B_{з1\text{макс}}$ определяется из (14-41). При $B_{з1\text{макс}} \leqslant 1,8$ Т напряженность поля $H_{з1}$ определяют на $^1/_3$ высоты зубца, считая от его наиболее узкой части.

Ширина зубца в расчетном сечении, мм,

$$b_{з1(1/3)} = \frac{\pi\,(D_1 + {}^2/_3 h_{\text{п1}})}{Z_1} - b_{\text{п1}}. \qquad (14\text{-}164)$$

Магнитная индукция в расчетном сечении, Т,

$$B_{з1(1/3)} = t_1 B_\delta / k_{\text{с}} b_{з1(1/3)}. \qquad (14\text{-}165)$$

Напряженность поля определяют из приложений 18—20 в зависимости от принятой марки стали.

При $B_{з1\text{макс}} > 1,8$ Т напряженность поля определяют в трех поперечных сечениях зубца — минимальном, среднем и максимальном.

Ширина зубца в расчетных сечениях, мм,

$$b_{з1\text{макс}} = \frac{\pi\,(D_1 + 2h_{\text{п1}})}{Z_1} - b_{\text{п1}}; \qquad (14\text{-}166)$$

$b_{з1\text{мин}}$ определяется из (14-41);

$$b_{з1\text{ср}} = (b_{з1\text{макс}} + b_{з1\text{мин}})/2. \qquad (14\text{-}167)$$

Магнитная индукция в расчетных сечениях:

$B_{з1макс}$ находится из (14-41);

$$B_{з1мин}=B_{з1макс}(b_{з1мин}/b_{з1макс}); \quad (14\text{-}168)$$

$$B_{з1ср}=B_{з1макс}(b_{з1ср}/b_{з1макс}). \quad (14\text{-}169)$$

Напряженность поля для каждого из расчетных сечений зубца, если индукция в них превышает 1,8 Т, определяют по приложениям 24 и 25 в зависимости от марки стали и коэффициента $k_з$, принимающего следующие значения:

для $B_{з1макс}$

$$k_{з1макс}=t_{1мин}/b_{з1мин}k_c; \quad (14\text{-}170)$$

для $B_{з1мин}$

$$k_{з1мин}=t_{1макс}/b_{з1макс}k_c; \quad (14\text{-}171)$$

для $B_{з1ср}$

$$k_{з1ср}=(k_{з1макс}+k_{з1мин})/2. \quad (14\text{-}172)$$

Расчетное значение напряженности поля, А/см,

$$H_{з1}=(H_{з1макс}+4H_{з1ср}+H_{з1мин})/6. \quad (14\text{-}173)$$

Расчетную длину магнитной силовой линии в зубце и магнитное напряжение зубцов статора определяют по (14-162) и (14-163).

г) Зубцы ротора

Овальные полузакрытые и закрытые пазы (рис. 14-12,а и б)

Магнитная индукция в равновеликом поперечном сечении зубца $B_{з2}$ принимается из (14-54). При $B_{з2}\leqslant 1,8$ Т напряженность поля принимают из приложений 18—20; при $B_{з2}>1,8$ Т — из приложений 24 и 25, причем коэффициент

$$k_{з(1/3)}=t_{2(1/3)}/b_{з2}k_c, \quad (14\text{-}174)$$

где

$$t_{2(1/3)}=\pi(D_{н2}-{}^4/_3h_{п2})/Z_2.$$

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце, мм,

$$L_{з2}=h_{п2}-0,2r_2. \quad (14\text{-}175)$$

Магнитное напряжение зубцов ротора, А,

$$F_{з2}=0,1H_{з2}L_{з2}. \quad (14\text{-}176)$$

Бутылочные закрытые пазы (рис. 14-12,в)

Средняя ширина зубца верхней части паза, мм,

$$b_{з.в2}=\pi(D_{н2}-2h_2-h)/Z_2-b. \quad (14\text{-}177)$$

Магнитная индукция в среднем сечении зубца верхней части паза $B_{з.в2}$ определяется из (14-54) с заменой $b_{з2}$ на $b_{з.в2}$.

Напряженность магнитного поля в зубце, поскольку она не превышает 1,8 Т, определяют из приложений 18—20.

Расчетная длина магнитной силовой линии, мм,

$$L_{з.в2}=h_2+h. \quad (14\text{-}178)$$

Магнитное напряжение зубцов верхней части паза, А,

$$F_{з.в2}=0,1H_{з.в2}L_{з.в2}. \qquad (14\text{-}179)$$

Магнитная индукция в равновеликом сечении зубца нижней части паза $B_{з.н2}$ определяется из (14-54).

Напряженность магнитного поля в зубце нижней части паза при $B_{з.н2}\leq 1,8$ Т, а также при $B_{з.н2}>1,8$ Т находят так же, как для зубцов ротора с овальными пазами. При $B_{з.н2}>1,8$ Т коэффициент

$$k_{з(1/3)}=t_{н2(1/3)}/b_{з.н2}k_c, \qquad (14\text{-}180)$$

где

$$t_{н2\,(1/3)}=\frac{\pi\left(D_{н2}-\frac{4}{3}h_{п2}-\frac{2}{3}(h_2+h)\right)}{Z_2}.$$

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце нижней части паза, мм,

$$L_{з.н2}=r_1+h_1+0,8r_2. \qquad (14\text{-}181)$$

Магнитное напряжение зубцов нижней части паза, А,

$$F_{з.н2}=0,1H_{з.н2}L_{з.н2}. \qquad (14\text{-}182)$$

Магнитное напряжение зубцов ротора, А,

$$F_{з2}=F_{з.в2}+F_{з.н2}. \qquad (14\text{-}183)$$

Пазы прямоугольные открытые (рис. 14-12,г) и прямоугольные полузакрытые (рис. 14-16)

Магнитную индукцию в наиболее узком месте зубца $B_{з2макс}$ находят из (14-68). При $B_{з2макс}\leq 1,8$ Т напряженность поля $H_{з2}$ определяют на $^1/_3$ высоты зубца, считая от его наиболее узкого места.

Ширина зубца в расчетном сечении, мм,

$$b_{з2\,(1/3)}=\frac{\pi\left(D_{н2}-\frac{4}{3}h_{п2}\right)}{Z_2}-b_{п2}. \qquad (14\text{-}184)$$

Магнитная индукция в расчетном сечении, Т,

$$B_{з2\,(1/3)}=\frac{t_2B_\delta}{b_{з2\,(1/3)}k_c}. \qquad (14\text{-}185)$$

Напряженность поля определяют из приложений 18—20.

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце, мм,

$$L_{з2}=h_{п2}. \qquad (14\text{-}186)$$

Магнитное напряжение зубцов ротора рассчитывают по (14-176).

При $B_{з2макс}>1,8$ Т напряженность поля находят в трех расчетных сечениях зубца — минимальном, среднем и максимальном.

Ширина зубца в расчетных сечениях, мм:

при открытом пазе

$$b_{з2макс}=t_2-b_{п2}; \qquad (14\text{-}187)$$

при полузакрытом пазе

$$b_{з2макс}=\pi(D_{н2}-2h_ш-2h_к)/z_2-b_{п2}; \qquad (14\text{-}187а)$$

$$b_{з2мин}=\pi(D_{н2}-2h_{п2})/z_2-b_{п2}. \qquad (14\text{-}187б)$$

Магнитная индукция в расчетных сечениях, Т,

$B_{з2макс}$ — из (14-68):

$$B_{з2мин}=B_{з2макс}(b_{з2мин}/b_{з2макс}); \qquad (14\text{-}188)$$

$$B_{з2ср}=(B_{з2макс}+B_{з2мин})/2. \qquad (14\text{-}189)$$

Напряженность поля для каждого из расчетных сечений зубца, если индукция в них превышает 1,8 Т, определяют из приложений 24 и 25, в зависимости от марки стали и коэффициента $k_з$, принимающего следующие значения:

для $B_{з2макс}$

$$k_{з2макс}=t_{2мин}/b_{з2мин}k_c; \qquad (14\text{-}190)$$

для $B_{з2мин}$

$$k_{з2мин}=t_{2макс}/b_{з2макс}k_c; \qquad (14\text{-}191)$$

для $B_{з2ср}$

$$k_{з2ср}=(k_{з2макс}+k_{з2мин})/2. \qquad (14\text{-}192)$$

Расчетное значение напряженности поля, А/см,

$$H_{з2}=(H_{з2макс}+4H_{з2ср}+H_{з2мин})/6. \qquad (14\text{-}193)$$

Расчетную длину магнитной силовой линии в зубце и магнитное напряжение зубцов ротора определяют по (14-176) и (14-186).

д) Спинка статора

Магнитную индукцию в спинке статора B_{c1} находят из (14-20).

Напряженность магнитного поля H_{c1} при $2p=2$ и $B_{c1}\leq 1{,}4$ Т, а также при $2p\geq 4$ берут из приложений 21—23; при $2p=2$ и $B_{c1}>1{,}4$ Т— из приложений 15—17, причем расчетное значение B_{c1} из (14-20) уменьшают на 0,4 Т.

Расчетная длина магнитной силовой линии, мм,

$$L_{c1}=\pi(D_{н1}-h_{c1})/4p. \qquad (14\text{-}194)$$

Магнитное напряжение спинки статора, А,

$$F_{c1}=0{,}1\,H_{c1}L_{c1}. \qquad (14\text{-}195)$$

е) Спинка ротора

Магнитную индукцию в спинке ротора B_{c2} находят из (14-56). Напряженность поля H_{c2} при $2p=2$ определяют из приложений 15—17, а при $2p\geq 4$ — из приложений 21—23.

Расчетная длина магнитной силовой линии, мм, при $2p=2$

$$L_{c2}=h_{c2}+{}^2/_3 d_{к2}; \qquad (14\text{-}196)$$

при $2p\geq 4$

$$L_{c2}=\pi(D_2+h_{c2}+1{}^1/_3 d_{к2})/4p. \qquad (14\text{-}197)$$

Магнитное напряжение спинки ротора, А,

$$F_{c2}=0{,}1\,H_{c2}L_{c2}. \qquad (14\text{-}198)$$

ж) Параметры магнитной цепи

Намагничивающая сила магнитной цепи на один полюс, А,

$$\Sigma F = F_\delta + F_{з1} + F_{з2} + F_{c1} + F_{c2}. \qquad (14\text{-}199)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_н = \Sigma F / F_\delta. \qquad (14\text{-}200)$$

Намагничивающий ток, А,

$$I_м = \frac{2,22 \Sigma F p}{m_1 w_{эф1}}, \qquad (14\text{-}201)$$

в процентах номинального тока

$$I_{м\%} = I_м \cdot 100 / I_{1н}. \qquad (14\text{-}202)$$

Главное индуктивное сопротивление, Ом,

$$x_м = E / I_м, \qquad (14\text{-}203)$$

где $E = k_e U_1$;
в относительных единицах

$$x_{м*} = x_м I_{1н} / U_1. \qquad (14\text{-}204)$$

Коэффициент рассеяния статора

$$\tau_1 = x_1 / x_м. \qquad (14\text{-}205)$$

Коэффициент сопротивления статора

$$\rho_1 = r_1 / (x_1 + x_м). \qquad (14\text{-}206)$$

Если $k_н \geqslant 1,7$ и при этом $\tau_1 \geqslant 0,05$, то определяют э. д. с. холостого хода, В,

$$E_0 = U_1 / (1 + \tau_1) \sqrt{1 + \rho_1^2}; \qquad (14\text{-}207)$$

при отличии E_0 от значения э. д. с. $E = k_e U_1$ более чем на 3% повторяют расчет намагничивающего тока и прочих параметров по (14-155)—(14-207) при магнитных индукциях B_δ, $B_{з1}$, $B_{з2} B_{c1}$ и B_{c2}, измененных пропорционально отношению E_0/E.

14-8. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧИХ И ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

В основу расчетного определения рабочих и пусковых характеристик асинхронных двигателей могла бы быть положена схема замещения, изображенная на рис. 14-25. Эта схема с достаточной степенью точности описывает зависимость $I_1 = f(s)$ при всех режимах работы двигателя, если известны значения входящих в нее активных и индуктивных сопротивлений. Параметры схемы замещения в диапазоне скольжений от критического до равного единице (режим короткого замыкания) не постоянны, а изменяются в зависимости от эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния. Магнитные потери в сердечнике статора могут быть учтены эквивалентным активным сопротивлением r_c, включенным непосредственно на выводы двигателя; это сделано

в предположении, что потери в стали создаются магнитным потоком, соответствующим полным потокосцеплениям обмотки статора, включая потокосцепления рассеяния; если пренебречь падением напряжения в активном сопротивлении обмотки статора, то этому потоку будет соответствовать напряжение U_1 на первичных зажимах.

При указанной схеме замещения ток статора

$$\dot I_1=\dot U_1\frac{1}{r_c}+\dot U_1\frac{r'_2+j(x'_2+x_м)s}{r_1r'_2+j(x_1+x_м)r'_2-[(x_1x'_2+x_1x_м+x'_2x_м)-j(x'_2+x_м)r_1]s}. \tag{14-208}$$

Второе слагаемое этого выражения при постоянных параметрах схемы замещения представляет собой уравнение окружности в комплексной форме. Как известно [Л. 30], уравнение окружности с произ-

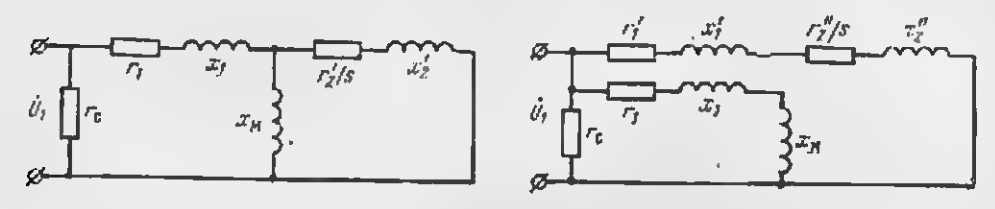


Рис. 14-25. Схема замещения асинхронного двигателя.

Рис. 14-26. Упрощенная схема замещения с вынесенным на зажимы намагничивающим контуром.

вольным расположением центра относительно начала координат в общем виде имеет вид:

$$\dot V=(\dot A+\dot Bv)/(\dot D+\dot Ev),$$

где $\dot A$, $\dot B$, $\dot D$, $\dot E$ — постоянные комплексные; v — вещественная переменная, изменяющаяся в пределах от $+\infty$ до $-\infty$.

Выражение (14-208) описывает, следовательно, круговую диаграмму асинхронного двигателя, полностью соответствующую схеме замещения на рис. 14-25.

Однако использование выражения (14-208) для построения круговой диаграммы или для аналитических расчетов при определении рабочих и пусковых характеристик двигателя сложно, поэтому с достаточной степенью точности применяется более простая зависимость $\dot I_1=f(s)$, базирующаяся на видоизмененной схеме замещения. Действительно, выражение (14-208) для тока статора $\dot I_1$ значительно упрощается, если схему замещения на рис. 14-25 преобразовать так, как это показано на рис. 14-26, т. е. если намагничивающий контур вынести на первичные выводы. Тогда ток статора будет равен:

$$\dot I_1=\dot U_1\frac{1}{r_c}+\dot U_1\frac{1}{r_1+j(x_1+x_м)}+\dot U_1\frac{s}{r''_2+[r'_1+j(x'_1+x''_2)]s}, \tag{14-209}$$

где r'_1, x'_1, r''_2, x''_2 — сопротивления схемы замещения, которые отличаются от соответствующих параметров схемы замещения на рис. 14-25 некоторыми комплексными коэффициентами [Л. 11, 25] в связи с вынесением намагничивающего контура на первичные выводы.

Из (14-209) видно, что ток статора можно рассматривать как сумму двух токов: тока при идеальном холостом ходе и тока нагрузки.

Третий член уравнения (14-209) является уравнением окружности, проходящей через конец вектора тока $\dot{I}_1 - \dot{I}_0$ при холостом ходе машины. Эта окружность является годографом вектора $\dot{I}''_2$ при изменении скольжения s от $+\infty$ до $-\infty$. Действительно, третий член выражения (14-209) может быть представлен в виде [Л. 25]

$$\dot{I}''_2 = \dot{U}_1/(\dot{C}z_1 + \dot{C}^2 z'_{2s}), \tag{14-210}$$

где $z_1 = r_1 + jx_1$; $z'_{2s} = r'_2/s + jx'_2$; $\dot{C} = (z_1 + jx_м)/jx_м = 1 + (r_1 + jx_1)/jx_м = (1+\tau_1)(1 - j\varrho_1) = Ae^{j\gamma}$; при этом $A = (1+\tau_1)\sqrt{1+\varrho^2_1}$; $-\operatorname{tg}\gamma = \varrho_1$; τ_1 определяют из (14-205), ϱ_1 — из (14-206).

Подставив в (14-210) $C = Ae^{j\gamma}$, получим:

$$\dot{I}''_2 = \frac{\dot{U}_1 e^{-j2\gamma}}{Ae^{-j\gamma}z_1 + A^2 z'_{2s}}.$$

Обозначив

$$Ae^{-j\gamma}z_1 = \dot{z}'_1 = r'_1 + jx'_1;$$

$$A^2 z'_{2s} = \dot{z}''_{2s} = r''_2/s + jx''_2,$$

окончательно для тока $\dot{I}''_2$ получим:

$$\dot{I}''_2 = \frac{\dot{U}_1 e^{-j2\gamma}}{(r'_1 + r''_2/s) + j(x'_1 + x''_2)} = \frac{\dot{U}_1 e^{-j2\gamma} s}{r''_2 + [r'_1 + j(x'_1 + x''_2)]s}, \tag{14-211}$$

т. е. уравнение окружности в комплексной форме, аналогичное третьему члену выражения (14-209); начало системы координат этой окружности лежит в конце вектора тока $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$, а координатные оси повернуты на угол 2γ влево относительно основной системы координат выражения (14-208); при этом

$$\left.\begin{aligned} r'_1 &= r_1; \\ x'_1 &= x_1(1+\tau_1)(1 + r_1\varrho_1/x_1); \\ r''_2 &= r'_2(1+\tau_1)^2(1+\varrho^2_1); \\ x''_2 &= x'_2(1+\tau_1)^2(1+\varrho^2_1). \end{aligned}\right\} \tag{14-212}$$

Так как в значительном большинстве случаев $\varrho_1 \leq 0{,}1$, то практически вполне достаточную точность при расчетах дают выражения

$$\left.\begin{aligned} r'_1 &= r_1; \\ x'_1 &= x_1(1+\tau_1); \\ r''_2 &= r'_2(1+\tau_1)^2; \\ x''_2 &= x'_2(1+\tau_1)^2. \end{aligned}\right\} \tag{14-212a}$$

Уравнение (14-209) с учетом (14-211) может быть положено в основу определения рабочих и пусковых характеристик асинхронного двигателя. Оно значительно проще и удобнее для пользования, чем основное выражение (14-208), и обеспечивает вполне точные результаты.

Рабочие и пусковые характеристики двигателя можно определять либо из круговой диаграммы, построенной (см. § 14-13) по (14-209) с учетом поворота осей координат для окружности $\dot{I}''_2 = f(s)$ на угол 2γ

согласно (14-211), либо аналитическим путем, без построения круговой диаграммы.

Аналитические способы определения характеристик двигателей особо важную роль играют при выполнении расчетов на ЭВМ, где пользование круговой диаграммой затруднительно. Ниже приводится аналитический способ, предложенный Т. Г. Сорокером [Л. 25]. При расчете по этому способу не требуется задаваться предварительным значением скольжения, проверять в конце расчета значение полученной мощности и после корректировки значения скольжения повторять весь расчет сначала.

В § 14-9—14-12 приведена методика расчетного определения основных параметров двигателя при холостом ходе и номинальном режиме, определения его пусковых характеристик и максимального момента [Л. 26]. Наряду с аналитическим способом определения рабочих и пусковых характеристик двигателя в § 14-13 дан также способ графического построения круговой диаграммы и определения из нее всех вышеуказанных характеристик.

Следует подчеркнуть, что как аналитические формулы, так и круговая диаграмма имеют в своей основе одни и те же уравнения (14-208), (14-209) и (14-211); поэтому результаты, полученные при пользовании тем или иным методом определения характеристик двигателя, идентичны.

Что касается степени точности получаемых результатов, то она для обоих способов практически одинакова. Кроме того, и в том и в другом случае преследовать особую точность получаемых результатов не имеет практического смысла, так как из-за известной приближенности расчетных формул для определения отдельных составляющих индуктивных сопротивлений, в особенности с учетом насыщения от полей рассеяния, нет особых оснований ожидать полной сходимости результатов расчета и опыта (некоторые расхождения всегда практически допустимы). Однако аналитический метод определения характеристик асинхронного двигателя является в настоящее время все же практически наиболее приемлемым, так как он с успехом используется при расчетах на ЭВМ.

14-9. ХОЛОСТОЙ ХОД

Реактивная составляющая тока статора при синхронном вращении, А,

$$I_{c.p}=U_1/x_м(1+\tau_1)(1+\rho^2_1), \tag{14-213}$$

где τ_1 определяют из (14-205), ρ_1 — из (14-206).

Если коэффициент сопротивления статора $\rho_1 \leqslant 0,1$, то здесь и далее принимают $\rho^2_1=0$.

Учитывая, что в режиме холостого хода ток статора I_0 мало отличается от тока $I_{c.p}$, электрические потери в обмотке статора при синхронном вращении будут, Вт,

$$P_{c.м1}=m_1 I^2_{cp} r_1 (1+\rho^2_1). \tag{14-214}$$

Расчетная масса стали зубцов статора, кг:
при трапецеидальных полузакрытых пазах

$$G_{з1}=7,8 Z_1 b_{з1} h_{п1} l_{эф1}\cdot 10^{-6}; \tag{14-215}$$

при прямоугольных полуоткрытых и открытых пазах

$$G_{з1}=7{,}8Z_1b_{з1ср}h_{п1}l_{эф1}\cdot 10^{-6}. \qquad (14\text{-}216)$$

Магнитные потери в зубцах статора, Вт,

$$P_{з1}=1{,}7p_{1,0/50}\left(\frac{f_1}{50}\right)^{\beta}B^2_{з1ср}G_{з1}, \qquad (14\text{-}217)$$

где коэффициент 1,7 учитывает влияние технологического процесса изготовления сердечника статора, а также неравномерности распределения магнитной индукции; $p_{1,0/50}$ — удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Т; при толщине листов 0,5 мм эти потери для рекомендуемых марок стали равны:

Марка стали	$p_{1,0/50}$, Вт/кг
2013 и 2211	2,5—2,6
2312	1,75
2411	1,6

β — показатель степени, равный 1,5 для стали марок 2013 и 2211; 1,4 — марки 2312; 1,3 — марки 2411

При $f_1=50$ Гц и толщине листов 0,5 мм потери в зубцах, Вт, выражаются зависимостями:

для стали марок 2013 и 2211

$$P_{з1}=4{,}4B^2_{з1ср}G_{з1}; \qquad (14\text{-}218)$$

для стали марки 2312

$$P_{з1}=3{,}0B^2_{з1ср}G_{з1}; \qquad (14\text{-}219)$$

для стали марки 2411

$$P_{з1}=2{,}7B^2_{з1ср}G_{з1}. \qquad (14\text{-}220)$$

Расчетная масса стали спинки статора, кг,

$$G_{c1}=7{,}8\pi(D_{н1}-h_{c1})h_{c1}l_{эф1}\cdot 10^{-6}. \qquad (14\text{-}221)$$

Магнитные потери в спинке статора, Вт,

$$P_{c1}=1{,}7p_{1,0/50}\left(\frac{f_1}{50}\right)^{\beta}B_{c1}G_{c1}, \qquad (14\text{-}222)$$

где значения $p_{1,0/50}$ и β такие же, как для зубцов статора.

При $f_1=50$ Гц и толщине листов 0,5 мм потери в спинке, Вт, выражаются зависимостями:

для стали марок 2013 и 2211

$$P_{c1}=4{,}4B^2_{c1}G_{c1}; \qquad (14\text{-}223)$$

для стали марки 2312

$$P_{c1}=3{,}0B^2_{c1}G_{c1}; \qquad (14\text{-}224)$$

для стали марки 2411

$$P_{c1}=2{,}7B^2_{c1}G_{c1}. \qquad (14\text{-}225)$$

Суммарные магнитные потери в сердечнике статора при холостом ходе, включающие добавочные потери в стали, Вт,

$$\Sigma P_c=P_{з1}\left[1+2\sqrt{\frac{f_1}{10}(k_з-1)^2}\right]+P_{c1}. \qquad (14\text{-}226)$$

Механические потери в двигателях со степенью защиты IP23, Вт:

с радиальной системой вентиляции, с радиальными вентиляционными каналами, с вентиляционными лопатками на торцах ротора

$$\Sigma P_{мх}=(n_к+11)(n/1000)^2(D_1/100)^3; \qquad (14\text{-}227)$$

с радиальной системой вентиляции без радиальных вентиляционных каналов, с вентиляционными лопатками на торцах ротора

$$\Sigma P_{мх}=k_{мх}(n/1000)^2(D_1/100)^3, \qquad (14\text{-}228)$$

где коэффициент $k_{мх}$ принимает следующие значения:

$D_{н1}$, мм	$2p$	$k_{мх}$
≤250	2	5
≤250	≥4	6
≥250	2	6
≥250	≥4	7

Для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 механические потери, Вт,

$$\Sigma P_{мх}=k_{мх}(n/1000)^2(D_{н1}/100)^4, \qquad (14\text{-}229)$$

где $k_{мх}=1{,}3(1-D_{н1}/1000)$ при $2p=2$ и $k_{мх}=1$ при $2p\geq4$.

Для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0151 механические потери, Вт,

$$\Sigma P_{мх}=(n_к+11)\left(\frac{n}{1000}\right)^2\left(\frac{D_1}{100}\right)^3+\left(\frac{n}{1000}\right)^2\left(\frac{0{,}6D_{н1}}{100}\right)^4. \qquad (14\text{-}229а)$$

Активная составляющая тока холостого хода, А,

$$I_{0а}=(P_{с.пп}+\Sigma P_с+\Sigma P_{мх})/m_1U_1. \qquad (14\text{-}230)$$

Ток холостого хода, А,

$$I_0=\sqrt{I^2_{0а}+I^2_{с.р}}. \qquad (14\text{-}231)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_0=I_{0а}/I_0. \qquad (14\text{-}232)$$

14-10. НОМИНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Из (14-212) или (14-212а) следует:

$$\left.\begin{aligned} r_к&=r'_1+r''_2;\\ x_к&=x'_1+x''_2;\\ z_к&=\sqrt{r^2_к+x^2_к};\\ z_\infty&=\sqrt{r^2_1+x^2_к}. \end{aligned}\right\} \qquad (14\text{-}233)$$

Здесь $r_к$, $x_к$, $z_к$ — расчетные приведенные активное, индуктивное и полное сопротивления короткого замыкания ($s=1$); z_∞ — расчетное приведенное полное сопротивление схемы замещения при бесконечно большом скольжении ($s=\infty$).

Механическая мощность двигателя, Вт,

$$P'_2=P_2+\Sigma P_{мх}+P_д, \qquad (14\text{-}234)$$

где $P_д$ — добавочные потери при номинальной нагрузке, Вт,

$$P_д=0{,}005P_2/\eta.$$

Механическую мощность двигателя можно представить также в следующем виде, Вт:

$$P'_2 = m_1 I''^2_2 r''_2 (1/s-1). \qquad (14\text{-}235)$$

Обозначив $r''_2(1/s-1)$ через $R_н$ (рис. 14-27), найдем [Л. 25]:

$$P'_2 = m_1 U^2_1 \frac{R_н}{(R_н + r_к)^2 + x^2_к}. \qquad (14\text{-}236)$$

При исходных значениях P'_2, U_1, $r_к$ и $x_к$ сопротивление $R_н$, Ом, схемы замещения на рис. 14-27 определяется решением квадратного уравнения (14-236):

$$R_н = \frac{m_1 U^2_1}{2P'_2} - r_к + \sqrt{\left(\frac{m_1 U^2_1}{2P'_2} - r_к\right)^2 - z^2_к}. \qquad (14\text{-}237)$$

Полное сопротивление схемы замещения, Ом,

$$Z_н = \sqrt{(R_н + r_к)^2 + x^2_к}. \qquad (14\text{-}238)$$

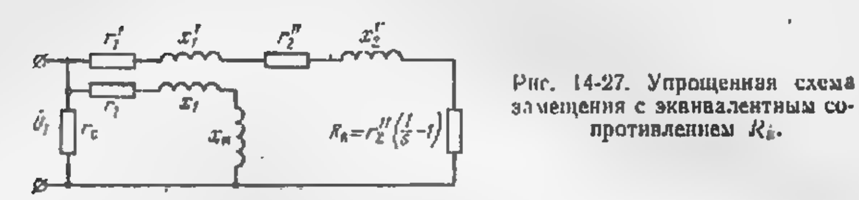


Рис. 14-27. Упрощенная схема замещения с эквивалентным сопротивлением $R_н$.

Целесообразно производить проверку вычисленных значений $R_н$ и $Z_н$ по формуле

$$m_1 U^2_1 R_н / Z^2_н = P'_2. \qquad (14\text{-}239)$$

Скольжение

$$s_н = \frac{1}{1 + R_н / r''_2}. \qquad (14\text{-}240)$$

Активная составляющая тока статора при синхронном вращении, А,

$$I_{c.н} = (P_{c.м1} + \Sigma P_c)/m_1 U_1. \qquad (14\text{-}241)$$

Расчетный ток ротора, А,

$$I''_2 = U_1 / Z_н. \qquad (14\text{-}242)$$

Активная и реактивная составляющие тока статора, А,

$$I_{a1} = I_{c.a} + I''_2 \left(\frac{R_н + r_к}{Z_н} \frac{1-\rho^2_1}{1+\rho^2_1} + \frac{x_к}{Z_н} \frac{2\rho_1}{1+\rho^2_1}\right); \qquad (14\text{-}243)$$

$$I_{p1} = I_{c.p} + I''_2 \left(\frac{x_к}{Z_к} \frac{1-\rho^2_1}{1+\rho^2_1} - \frac{R_н + r_к}{Z_к} \frac{2\rho_1}{1+\rho^2_1}\right). \qquad (14\text{-}244)$$

Фазный ток статора, А.

$$I_1 = \sqrt{I^2_{a1} + I^2_{p1}}. \qquad (14\text{-}245)$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = I_{a1}/I_1. \qquad (14\text{-}246)$$

Линейная нагрузка статора, А/см,

$$A_1 = 10 I_1 \frac{N_{п1}}{a_1 t_1}. \qquad (14\text{-}247)$$

Линейная нагрузка ротора, А/см,

$$A_2 = A_1 \frac{I''_2 (1+\tau_1)\sqrt{1+\rho^2_1}}{I_1} \frac{k_{об1}}{k_{об2} k_{ск}}; \qquad (14\text{-}248)$$

для короткозамкнутого ротора $k_{об2}=1$.

Ток в стержне короткозамкнутого ротора, А,

$$I_{ст} = I''_2 \frac{2m_1 w_1 k_{об1}}{Z_2 k_{ск}} (1+\tau_1)\sqrt{1+\rho^2_1}. \qquad (14\text{-}249)$$

Ток в короткозамыкающем кольце, А,

$$I_{кл} = I_{ст} / k_{пр2}, \qquad (14\text{-}250)$$

где $k_{пр2}$ определяют из (14-116).

Распределение тока в стержне короткозамкнутого ротора с бутылочными пазами:

ток в верхней части стержня, А,

$$I_{ст.в} = I_{ст} (1-\theta_д); \qquad (14\text{-}251)$$

ток в нижней части стержня, А,

$$I_{ст.н} = I_{ст} \theta_д, \qquad (14\text{-}252)$$

где $\theta_д$ определяют из (14-141).

Фазный ток фазного ротора, А,

$$I_2 = I''_2 \frac{w_{эф1}}{w_{эф2}} (1+\tau_1)\sqrt{1+\rho^2_1}. \qquad (14\text{-}253)$$

Плотность тока, А/мм²,

$$J = I / q, \qquad (14\text{-}254)$$

где I и q — ток и площадь поперечного сечения рассчитываемой обмотки или ее участка.

Электрические потери в обмотке статора при нагрузке, Вт,

$$P_{м1} = m_1 I^2_1 r_1. \qquad (14\text{-}255)$$

Электрические потери в обмотке ротора при нагрузке, Вт,

$$P_{м2} = m_1 I''^2_2 r''_2. \qquad (14\text{-}256)$$

Суммарные потери в двигателе, Вт,

$$\Sigma P = P_{м1} + P_{м2} + \Sigma P_с + \Sigma P_{мх} + P_д. \qquad (14\text{-}257)$$

Подводимая мощность двигателя, Вт,

$$P_1 = P_2 + \Sigma P. \qquad (14\text{-}258)$$

Коэффициент полезного действия двигателя, %,

$$\eta = (1 - \Sigma P / P_1) 100. \qquad (14\text{-}259)$$

Формулы для проверки, Вт:

$$\left.\begin{array}{l} P_1 = m_1 I_{a1} U_1; \\ P_2 = m_1 I_1 \frac{\eta}{100} \cos\varphi. \end{array}\right\} \quad (14\text{-}260)$$

Расчет рабочих характеристик $(I_1, \eta, \cos\varphi, s) = f(P_2)$ ведется для значений мощности kP_2, где $k=0,25$; 0,5; 0,75; 1,25, так же, как и для номинального режима работы ($k=1,0$).

14-11. НАЧАЛЬНЫЙ ПУСКОВОЙ МОМЕНТ И НАЧАЛЬНЫЙ ПУСКОВОЙ ТОК

Отношение начального пускового момента к номинальному $M_п/M_н$ у низковольтных двигателей с короткозамкнутым ротором должно быть не ниже, а отношение начального пускового тока к номинальному $I_{п1}/I_{1н}$ — не выше значений, оговоренных в ГОСТ 19523-74. Для высоковольтных двигателей эти параметры установлены ГОСТ 9362-68. При указанных в ГОСТ отношениях $I_{п1}/I_{1н}$ возникает насыщение путей потоков пазового рассеяния, вызывающее существенное уменьшение индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора. Кроме того, в обмотке ротора необходимо учитывать эффект вытеснения тока. Оба эти фактора влекут за собой увеличение пускового тока и пускового момента.

Ниже приводится порядок расчета пусковых характеристик с учетом вытеснения тока [Л. 26] и насыщения от полей рассеяния [Л. 32].

Активные и индуктивные сопротивления обмотки короткозамкнутого ротора при пуске с учетом вытеснения тока рассчитывают:

для ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами и литой клеткой: активное сопротивление — по (14-108)—(14-120), индуктивное сопротивление — по (14-121)—(14-129);

для ротора с бутылочными закрытыми пазами и литой клеткой: активное сопротивление — по (14-130)—(14-135) и (14-141), индуктивное сопротивление — по (14-136)—(14-140) и (14-142);

для ротора с прямоугольными открытыми пазами и сварной клеткой: активное сопротивление — по (14-110), (14-143), (14-115), (14-116), (14-118), (14-119), индуктивное сопротивление — по (14-110), (14-121), (14-125), (14-127)—(14-129), (14-144).

Значения сопротивлений r'_1, r''_2, x'_1, x''_2 определяют согласно (14-212) или (14-212а), сопротивлений $r_к$, $x_к$, $z_к$ — согласно (14-233).

Для учета насыщения путей потоков рассеяния все рассчитанные проводимости статора и ротора подразделяются на две группы.

К первой группе относятся проводимости, зависящие от насыщения, т. е. переменные: составляющие проводимости рассеяния клиновой части и шлица пазов статора и ротора, мостиков закрытых пазов ротора, проводимости дифференциального рассеяния статора и ротора.

Ко второй группе относятся проводимости, не зависящие от насыщения, т. е. постоянные: проводимости рассеяния пазов статора и ротора за вычетом клиновой части, шлица, мостиков закрытых пазов, проводимости рассеяния лобовых частей обмоток статора и фазного ротора, проводимости рассеяния короткозамыкающих колец и проводимость рассеяния скоса пазов.

Составляющая коэффициента пазовой проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения:

паз трапецеидальный полузакрытый (рис. 14-18,*а*)

$$\lambda_{п1пер} = \left(\frac{3h_к}{b_3 + 2b_ш} + \frac{h_ш}{b_ш}\right) k'_\beta; \qquad (14\text{-}261)$$

паз прямоугольный полуоткрытый (рис. 14-18, *б*)

$$\lambda_{п1пер} = \left(\frac{3h_к}{b_ш + 2b_ш} + \frac{h_ш}{b_ш}\right) k'_\beta; \qquad (14\text{-}262)$$

паз прямоугольный открытый (рис. 14-18, *в*)

$$\lambda_{п1пер} = \frac{(h_к + h_ш) k'_\beta}{b_ш}. \qquad (14\text{-}263)$$

Здесь k'_β — коэффициент, определяют по рис. 14-19; для однослойных обмоток с диаметральным шагом $k'_\beta = 1$.

Составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения,

$$\lambda_{1пер} = \lambda_{п1пер} + \lambda_{д1}. \qquad (14\text{-}264)$$

Составляющая коэффициента пазовой проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения:

паз овальный полузакрытый (рис. 14-12,*а*)

$$\lambda_{п2пер} = h_ш / b_ш; \qquad (14\text{-}265)$$

паз овальный закрытый (рис. 14-12,*б*)

$$\lambda_{п2пер} = 1,12 \frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2}, \qquad (14\text{-}266)$$

где I_2 — значение тока стержня ротора, А, определяют по (14-123);

паз бутылочный закрытый (рис. 14-12,*в*)

$$\lambda_{п.в.пер} = 1,12 \frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2}, \qquad (14\text{-}267)$$

где I_2 — суммарный ток верхней и нижней частей стержня, А, определяют по (14-123);

паз прямоугольный открытый (рис. 14-12,*г*)

$$\lambda_{п2пер} = \frac{h_ш}{b_ш}. \qquad (14\text{-}268)$$

Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения,

$$\lambda_{2пер} = \lambda_{п2пер} + \lambda_{д2}. \qquad (14\text{-}269)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения, Ом:

двигатели с овальными полузакрытыми и закрытыми и с прямоугольными открытыми пазами короткозамкнутого ротора

$$x_{пер} = x'_1 \frac{\lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_2 \frac{\lambda_{2пер}}{\lambda_2}; \qquad (14\text{-}270)$$

двигатели с бутылочными закрытыми пазами короткозамкнутого ротора

$$x_{пер} = x'_1 \frac{\lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_п \frac{\lambda_{?пер}}{\lambda_{?0}}. \qquad (14\text{-}271)$$

Здесь λ_1, λ_2, λ_{2o} определяют соответственно по (14-105), (14-127), (14-138); x'_1, x''_2 — по (14-212),

$$x''_0 = x'_0(1+\tau_1)^2, \quad (14\text{-}272)$$

где x'_0 и τ_1 рассчитывают по (14-140) и (14-205).

Составляющие коэффициентов проводимости рассеяния статора и ротора, не зависящие от насыщения, определяют вычитанием из λ_1, λ_2, $\lambda_{2п}$ коэффициентов проводимостей $\lambda_{1пер}$, $\lambda_{2пер}$, рассчитанных по (14-264), (14-269).

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения, Ом:

двигатели с овальными полузакрытыми и закрытыми и с прямоугольными открытыми пазами короткозамкнутого ротора

$$x_{пост} = x'_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_2 \frac{\lambda_2 - \lambda_{2пер}}{\lambda_2}; \quad (14\text{-}273)$$

двигатели с бутылочными закрытыми пазами короткозамкнутого ротора

$$x_{пост} = x'_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_0 \frac{\lambda_{2o} - \lambda_{2пер}}{\lambda_{2o}} + x''_в \theta^2_x, \quad (14\text{-}274)$$

где $x''_в$ определяют по (14-272) с заменой x'_0 на $x'_в$; $x'_в$ — по (14-139); θ_x — по (14-142).

Расчетный ток ротора при пуске с учетом вытеснения тока в стержнях и насыщения путей потоков рассеяния для двигателей с открытыми, с полузакрытыми овальными пазами ротора и любой формой открытия пазов статора [Л. 32], А,

$$I''_{п2} = \frac{U_1}{\sqrt{r^2_к + (x_{пост} + 0{,}0825x_{пер})^2}} - \frac{1{,}24 \cdot 10^3 \delta a_1 x_{пер} (x_{пост} + 0{,}0825x_{пер})}{N_{п1} [r^2_к + (x_{пост} + 0{,}0825x_{пер})^2]}, \quad (14\text{-}275)$$

где δ, a_1, $N_{п1}$ определяют по § 14-2, 14-3.

В случае закрытых овальных и бутылочных пазов ротора, в отличие от [Л. 32], расчет тока ротора ведется по (14-275) с заменой коэффициента при $x_{пер}$, равного 0,0825, на коэффициент, равный 0,25.

Расчетные параметры схемы замещения при пуске с учетом вытеснения тока в стержнях ротора и насыщения путей потоков рассеяния, Ом:

$$z_к = U_1 / I''_{п2}; \quad (14\text{-}276)$$

$$x_к = \sqrt{z^2_к - r^2_к}. \quad (14\text{-}277)$$

Активная составляющая тока статора при пуске, А,

$$I_{п.а1} = I_{с.а} + I''_{п2} \left(\frac{r_к}{z_к} \frac{1-\rho^2_1}{1+\rho^2_1} + \frac{x_к}{z_к} \frac{2\rho_1}{1+\rho^2_1} \right). \quad (14\text{-}278)$$

Реактивная составляющая тока статора при пуске, А,

$$I_{п.р1} = I_{с.р} + I''_{п2} \left(\frac{x_к}{z_к} \frac{1-\rho^2_1}{1+\rho^2_1} - \frac{r_к}{z_к} \frac{2\rho_1}{1+\rho^2_1} \right). \quad (14\text{-}279)$$

При этих расчетах принимают значения активной и реактивной составляющих тока при синхронном вращении $I_{с.а}$ и $I_{с.р}$, а также значения τ_1 и ρ_1, вычисленные при расчете номинального режима работы.

Фазный ток статора при пуске, А,

$$I_{п1}=\sqrt{I^2_{п.а1}+I^2_{п.р1}}. \qquad (14\text{-}280)$$

Кратность пускового тока равна $I_{п1}/I_{1н}$.

Кратность пускового момента

$$M_п/M_н=m_1 I''^2_{2п} r''_2 (1-s_н)/P_2, \qquad (14\text{-}281)$$

где P_2 выражено в ваттах.

14-12. МАКСИМАЛЬНЫЙ МОМЕНТ

Отношение максимального момента к номинальному $M_м/M_н$ не должно быть менее значений, оговоренных в ГОСТ 19523-74 для низковольтных двигателей и в ГОСТ 9362-68 для высоковольтных двигателей.

При максимальном моменте токи статора и ротора в 2—3 раза больше, чем при номинальной нагрузке. При таких токах необходимо учитывать влияние насыщения путей потоков рассеяния на уменьшение индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора, а следовательно, на увеличение максимального момента. Вытеснением тока в стержнях ротора (короткозамкнутого или фазного со стержневой обмоткой) при расчете максимального момента пренебрегают, так как критическое скольжение сравнительно невелико и частота тока в роторе f_2 мала.

Для расчета максимального момента используют схему замещения рис. 14-27, в которой значения индуктивных сопротивлений принимают с учетом насыщения. Сопротивление $R_н$ в схеме замещения заменяется сопротивлением $R_м$.

Разделение проводимостей рассеяния и определение индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора выполняют по формулам (14-261)—(14-274). При этом λ_2 и λ_{20} соответствуют проводимостям, рассчитанным в номинальном режиме работы двигателя, без учета вытеснения тока в стержнях ротора. В (14-274) θ_x заменяется на $\theta_д$ из (14-141).

Для двигателей с фазным ротором $\lambda_{п2пер}$ определяют по (14-262) с заменой в формуле $b_{п1}$ на $b_{п2}$; $x_{пер}$ и $x_{пост}$ рассчитывают соответственно по (14-270) и (14-273).

Расчетный ток ротора с учетом насыщения путей потоков рассеяния для двигателей с открытыми, полузакрытыми овальными пазами короткозамкнутого ротора и прямоугольными полузакрытыми пазами фазного ротора при любой форме открытия пазов статора, А,

$$I''_{м2}=\frac{U_1}{\sqrt{2\left[r'^2_1+(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})\right]}}-$$

$$-\frac{1{,}24\cdot 10^3\delta a_1\left[r'_1+2(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})\right]x_{пер}}{2N_{п1}\left[r'^2_1+(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})\right]}, \qquad (14\text{-}282)$$

где $\delta, a_1, N_{п1}$ определяют по § 14-2, 14-3.

В случае закрытых овальных и бутылочных пазов ротора расчет $I''_{м2}$ ведут по (14-282) с заменой коэффициента при $x_{пер}$, равного 0,0825, на коэффициент, равный 0,25.

Сопротивления схемы замещения при максимальном моменте, Ом,

$$z_м = U_1 / I''_{м2};$$ (14-283)

$$x_к = \sqrt{z^2_\infty - r_1'^2};$$ (14-284)

$$R_м = z_\infty + r'_1.$$ (14-285)

В (14-284) и (14-285) z_∞ в отличие от (14-233) определяют следующим образом, Ом,

$$z_\infty = \frac{\sqrt{r'^2_1 + 2Z^2_м} - r'^2_1}{2}.$$

Активная составляющая тока статора, А,

$$I_{м.а1} = I_{с.а} + I''_{м2}\left(\frac{R_м}{Z_м}\frac{1-\rho^2_1}{1+\rho^2_1} + \frac{x_к}{Z_м}\frac{2\rho_1}{1+\rho^2_1}\right).$$ (14-286)

Здесь и далее подставляют уточненные значения $I''_{м2}$, $R_м$, $Z_м$, $x_к$; значение $I_{с.а}$ определяют из (14-241).

Реактивная составляющая тока статора, А,

$$I_{м.р1} = I_{с.р} + I''_{м2}\left(\frac{x_к}{Z_м}\frac{1-\rho^2_1}{1+\rho^2_1} - \frac{R_м}{Z_м}\frac{2\rho_1}{1+\rho^2_1}\right);$$ (14-287)

значение $I_{с.р}$ находят из (14-213).

Ток фазы статора, А,

$$I_{м1} = \sqrt{I^2_{а1} + I^2_{р1}}.$$ (14-288)

Кратность максимального момента

$$M_м / M_н = m_1 U^2_1 (1 - s_н) / 2R_м P_2.$$ (14-289)

Скольжение при максимальном моменте

$$s_м = r''_2 / z_\infty.$$ (14-290)

14-13 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ И ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И КРУГОВОЙ ДИАГРАММЫ

а) Построение круговой диаграммы

Круговую диаграмму строят в следующем порядке.

Определяют диаметр рабочего круга, мм,

$$D_а = U_1 / C_т x_к,$$ (14-291)

где $C_т$ — масштаб тока, А/мм, который выбирают таким, чтобы диаметр круга $D_а$ был равен 150—200 мм.

Определяют масштаб мощности, кВт/мм,

$$C_м = m_1 U_1 C_т 10^{-3}.$$

Строят полуокружность с диаметром $D_а = OD$ (рис. 14-28), причем при пользовании миллиметровой бумагой рекомендуется диаметр OD

располагать горизонтально. От точки O откладывают отрезок OG, равный 100 мм, и перпендикулярно к OG строят отрезки, мм:

$$\left.\begin{aligned} GH &= 2\rho_1 100; \\ GF &= r_1 100/x_\text{р}; \\ GE &= r_\text{к} 100/x_\text{к}, \end{aligned}\right\} \qquad (14\text{-}292)$$

где ρ_1 определяют из (14-206), r_1 — из (11-97), $r_\text{к}$ и $x_\text{к}$ из (14-233).

Проводят прямые: из точки O через точку E до пересечения с окружностью в точке K, которая соответствует скольжению $s=1$, и через точку F до пересечения с окружностью в точке B, которая соответствует скольжению $s=\infty$. Прямая OK — это линия механических мощностей, развиваемых ротором, прямая OB — линия электромагнитных мощностей или моментов.

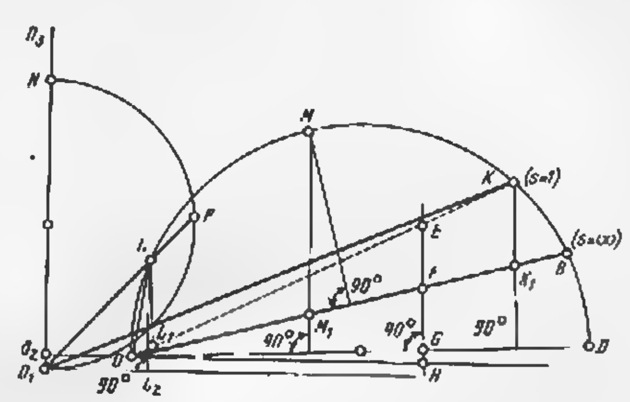


Рис. 14-28. Построение круговой диаграммы.

Проводят прямую через точки O и H и откладывают на ней влево от точки O отрезок OO_2, равный $I_\text{ср}$, определяемый из (14-213).

На продолжении перпендикуляра O_2O_3 к линии O_2H откладывают отрезок O_2O_1, равный $I_\text{са}$, определяемый из (14-241).

Откладывают на прямой O_1O_3 отрезок O_1N, равный 100 мм, и строят на нем полуокружность радиусом 50 мм.

При $\rho_1 < 0{,}02$ отрезок $GH \approx 0$, а отрезок O_2O является продолжением линии диаметра OD.

б) Определение рабочих характеристик

Задавшись номинальной мощностью двигателя $P_{2\text{н}}$, определяют соответствующую ей механическую мощность двигателя, Вт,

$$P'_2 = P_{2\text{н}} + P_\text{д} + \Sigma P_\text{мх}. \qquad (14\text{-}293)$$

Находят на окружности точку L, расстояние от которой до прямой OK по линии LL_1, перпендикулярной к диаметру OD, равно P'_2.

Определяют ток статора I_1, равный отрезку O_1L, и ток ротора I''_2, равный отрезку OL, в масштабе тока.

Находят на диаграмме значение $\cos\varphi$, равное отрезку $O_1P/100$, где O_1P выражено в миллиметрах.

Определяют подводимую мощность, Вт,

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi; \qquad (14\text{-}294)$$

она равна (в масштабе мощности) длине перпендикуляра LL_2, опущенного из точки L на ось абсцисс.

Вычисляют потери, Вт:
в обмотке статора

$$P_{м1}=m_1 I^2_1 r_1; \tag{14-295}$$

в обмотке ротора

$$P_{м2}=m_1 I''^2_2 r''_2, \tag{14-296}$$

суммарные потери:

$$\Sigma P=P_{м1}+P_{м2}+P_о+\Sigma P_{мх}+P_д. \tag{14-297}$$

Полезная мощность на валу, Вт,

$$P_2=P_1-\Sigma P. \tag{14-298}$$

Если полученное значение P_2 отличается от заданного $P_{2н}$, то определяют уточненные значения токов, А:

$$I_{1н}\approx I_1 P_{2н}/P_2;$$

$$I''_{2н}\approx I''_2 P_{2н}/P_2$$

и проводят с этими значениями токов снова расчеты по формулам (14-294)—(14-298).

Определяют коэффициент полезного действия, %.

$$\eta=(1-\Sigma P/P_1)100. \tag{14-299}$$

Определяют скольжение

$$s=P_{м2}/(P'_2+P_{м2}). \tag{14-300}$$

Аналогичный расчет проводят также и для других значений мощностей, равных 0,25; 0,5; 0,75 и 1,25 $P_{2н}$, а затем строят рабочие характеристики $(I_1, \cos\varphi, \eta, s)=f(P_2)$.

в) Определение максимального момента и пусковых характеристик

Если из середины отрезка OB (рис. 14-28) восстановить к нему перпендикуляр до пересечения с окружностью в точке M и опустить из этой точки перпендикуляр к диаметру окружности OD до пересечения с линией OB в точке M_1, то отрезок MM_1 представит собой максимальный вращающий момент $M_м$ в масштабе мощности; при опускании перпендикуляра из точки K к диаметру окружности OD до пересечения с линией OB в точке K_1 отрезок KK_1 представит собою в масштабе мощности начальный пусковой момент $M_п$; отрезок O_1K линии, проведенной через точки O_1 и K, будет соответствовать (в масштабе тока) начальному пусковому току двигателя; таким образом,

$$\left.\begin{aligned} M_м/M_н&=MM_1/LL_1;\\ M_п/M_н&=KK_1/LL_1;\\ I_{п1}/I_{1н}&=O_1K/O_1L. \end{aligned}\right\} \tag{14-301}$$

г) Учет эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

Изложенная методика построения круговой диаграммы исходит из условия сохранения активных и индуктивных сопротивлений двигателя неизменными как при номинальном режиме работы, так и при пуске и ход. На самом же деле сопротивления двигателя, как это указывалось выше, остаются постоянными только в диапазоне нагрузок

от холостого хода до сравнительно небольших перегрузок, встречающихся в обычной практике эксплуатации. При дальнейшем увеличении токов статора и ротора, а также частоты скольжения в роторе (вплоть до $s=1$ и $f_2=f_1$) увеличивается насыщение путей потоков рассеяния и вытеснение тока в стержнях ротора. Связанное с этим уменьшение индуктивных сопротивлений приводит к постепенному увеличению диаметра $D_к$ круговой диаграммы согласно (14-291), а увеличение сопротивления r''_2 при вытеснении тока — к перемещению точки K по окруж-

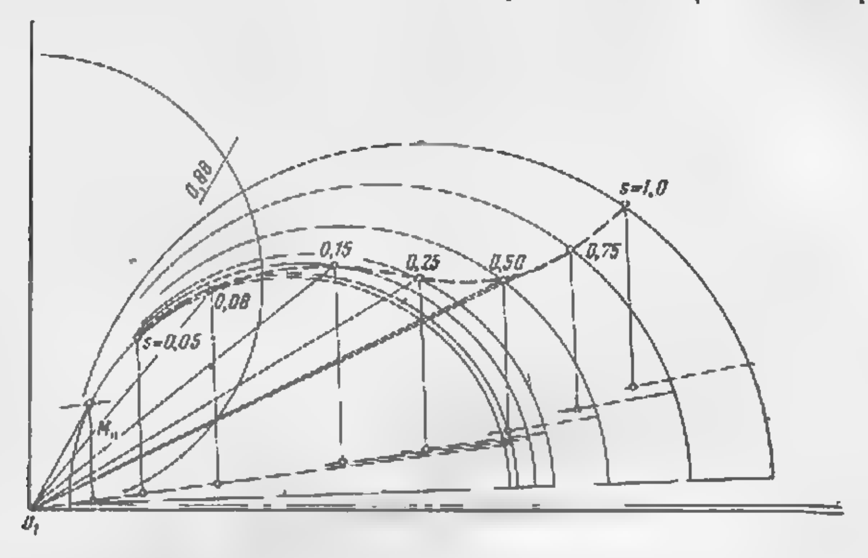


Рис. 14-29. Диаграмма тока при изменяющихся индуктивных и активных сопротивлениях.

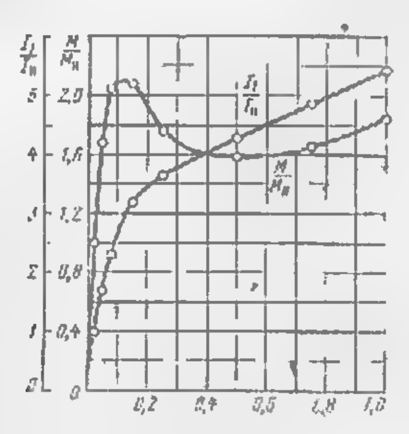


Рис. 14-30. Зависимости $M/M_н = f(s)$ и $I_1/I_{1н} = f(s)$.

ности (на рис. 14-28) вверх, так как из (14-292) и (14-233) следует, что отрезок $EF=GE \quad GF=r''_2/x_к$, т. е. пропорционален сопротивлению r''_2.

Для получения действительной диаграммы тока двигателя с короткозамкнутым ротором можно построить ряд круговых диаграмм для различных значений тока I_1 или скольжения s (например, для $s\approx0,25$; 0,5; 0,75; 1,0) на основе активных и индуктивных сопротивлений, отвечающих данным значениям I_1 и s. При определении из (14-292) отрезка GE (рис. 14-28) следует учитывать кроме изменившегося значения сопротивления $x_к$ также и увеличение сопротивления r''_2, входящего

в сопротивление $r_к$ по (14-233), вследствие вытеснения тока в стержнях при данной частоте скольжения $f_2=sf_1$; расчет изменения сопротивлений r''_2 и x''_2 от эффекта вытеснения тока, а также сопротивлений x'_1 и x''_2 от насыщения путей потоков рассеяния следует вести в соответствии с указаниями § 14-11, если в (14-233) вместо r''_2 подставлять r''_2/s.

На каждой из построенных диаграмм (рис. 14-29) будет иметь место только одна реальная точка, соответствующая значениям I_1 и s. Соединив эти точки непрерывной линией, получим достаточно точную диаграмму токов короткозамкнутого асинхронного двигателя.

Семейству круговых диаграмм на рис. 14-29 соответствуют характеристики $(M/M_н, I_1/I_{1н})=f(s)$, построенные на рис. 14-30. Такие характеристики необходимы для решения ряда вопросов электропривода, включая вопросы затяжных пусков и пускозащитной аппаратуры.

Для двигателей с фазным ротором построение аналогичного семейства круговых диаграмм практически может быть ограничено областью максимального момента.

Методы построения диаграмм токов короткозамкнутых асинхронных двигателей с двойной клеткой, бутылочными пазами, глубокими пазами с параллельными стенками при графоаналитических расчетах здесь за недостатком места не приводятся. Необходимые сведения по этому вопросу можно найти, например, в [Л. 12, 14]. Применяемые обычно в качестве поисковых графоаналитические методы дают возможность построения геометрических мест конца вектора тока I_1 при изменении s от $+\infty$ до $-\infty$ (без учета изменения индуктивных сопротивлений от насыщения).

д) Дополнительные особенности графического метода определения характеристик

Изложенная выше методика построения семейства круговых диаграмм (рис. 14-29) является практически универсальной, так как она позволяет определять характеристики двигателя в области больших скольжений вне зависимости от вида ротора, если все сопротивления схемы замещения известны и известна зависимость r''_2 и $x''_к$ от скольжения. Такую же универсальность в этой области имеют и аналитические методы расчета.

Следует, однако, отметить, что в отличие от аналитических методов определения характеристик короткозамкнутого двигателя с ротором любого вида метод определения этих характеристик из круговых диаграмм (вернее, из диаграммы тока) имеет то существенное преимущество, что он дает наглядное представление о поведении характеристик двигателя при варьировании его основных расчетных параметров. Более того, диаграмма с требуемыми характеристиками двигателя может быть ориентировочно построена предварительно; исходя из этого построения, могут быть определены все необходимые для выполнения данных требований параметры двигателя, которые затем в процессе дальнейшего расчета уточняются. Такой порядок расчета бывает весьма важным и целесообразным при разработке двигателей различных модификаций, где большие требования предъявляются к электрическим характеристикам, в особенности пусковым. В этих случаях с учетом данных двигателя основного исполнения при помощи заранее построенной ориентировочной диаграммы можно легко и быстро установить основные размеры всех элементов активной части, включая форму и размеры пазов рото-

ра, число витков обмотки и т. д. Такая возможность решения задачи «от ответа», представляемая круговой диаграммой, указывает на существенное преимущество этого метода перед аналитическим методом определения характеристик двигателя.

14-14. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

а) Общие положения

Задачей теплового расчета является определение превышения температуры обмотки статора и обмотки фазного ротора над температурой охлаждающей среды при продолжительном режиме работы. Эти превышения должны быть ниже предельных допускаемых значений, установленных ГОСТ 183-74, при температуре охлаждающей среды +40°С и высоте над уровнем моря не более 1000 м (см. табл. 5-1).

Возникающие в двигателе потери выделяются в виде тепла и отводятся охлаждающим воздухом либо непосредственно через поверхности активных частей машины, либо через другие, граничащие с ними детали конструкции.

Тепловой поток, проходящий через поверхность, непосредственно соприкасающуюся с охлаждающей средой, Вт,

$$P_п = \alpha \Delta\vartheta_п S_п, \qquad (14\text{-}302)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, зависящий от степени шероховатости поверхности, скорости, режима движения и параметров охлаждающей среды, Вт/(мм²·°С); $\Delta\vartheta_п$ — превышение температуры поверхности над температурой охлаждающей среды, °С; $S_п$ — поверхность охлаждения, мм².

Уравнение (14-302) по аналогии с электрической цепью можно представить в следующем виде:

$$\Delta\vartheta_п = P_п R_п, \qquad (14\text{-}303)$$

где превышение (перепад) температуры $\Delta\vartheta_п$ соответствует падению напряжения; потери (тепловой поток) $P_п$ — току, а тепловое сопротивление $R_п$, °С/Вт, — сопротивлению электрической цепи; из (14-302) и (14-303) следует:

$$R_п = 1/\alpha S_п.$$

По пути к охлаждаемой поверхности тепловой поток преодолевает тепловые сопротивления, определяемые процессами теплопроводности. При расчете перепада температуры, соответствующего этим сопротивлениям, учитывают только тепловое сопротивление электрической изоляции, обладающей относительно малым коэффициентом теплопроводности; перепадом температуры в меди и стали пренебрегают, так как их коэффициент теплопроводности во много раз больше.

Тепловой поток, проходящий через изоляцию, Вт,

$$P_и = \lambda_и \Delta\vartheta_и S_и / b_и, \qquad (14\text{-}304)$$

где $\lambda_и$ — коэффициент теплопроводности изоляционного материала, Вт/(мм·°С); $\Delta\vartheta_и$ — перепад температуры в изоляции, °С; $S_и$ — теплопередающая поверхность изоляционного материала, мм²; $b_и$ — толщина изоляционного материала, мм.

По аналогии с электрической цепью уравнение (14-304) может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta\theta_{и}=P_{и}R_{и}, \quad (14\text{-}305)$$

где $R_{и}=b_{и}/\lambda_{и}S_{и}$, °С/Вт.

Выделяющиеся в двигателе исполнения IP23 потери нагревают отводящий их воздух. Превышение температуры охлаждающего воздуха

$$\Delta\theta_{в}=\Sigma P/\alpha_{в}S_{дв}, \quad (14\text{-}306)$$

где ΣP — сумма потерь, отводимых через внутренние поверхности двигателя, Вт; $\alpha_{в}$ — коэффициент подогрева воздуха, зависящий от теплоотдающей способности охлаждаемой поверхности и от интенсивности перемещения воздуха внутри двигателя, Вт/(мм²·°С); $S_{дв}$ — охлаждаемые внутренние поверхности двигателя, мм².

У двигателей исполнения IP44 условно можно принять, что тепловое сопротивление корпуса незначительно и что превышение температуры корпуса над температурой охлаждающей среды примерно равно превышению температуры воздуха внутри двигателя $\Delta\theta_{в}$, которое определяют также по (14-306). При этом подставляют значение $\alpha_{в}$, соответствующее условиям перемещения воздуха в замкнутом объеме двигателя и обдува внешней поверхности корпуса наружным вентилятором; значение $S_{дв}$ должно учитывать конструкцию охлаждающих устройств (наличие ребер, каналов).

Физическая картина распределения тепловых потоков в электрических машинах очень сложна, а точное определение коэффициентов и поверхностей теплоотдачи, коэффициентов теплопроводности, распределения потерь энергии в машине затруднительно. Значительное влияние на отклонение расчетных значений превышений температуры от действительных могут оказывать технологические факторы.

На первой стадии проектирования серии, до ее полной конструкторской проработки, целесообразна приближенная оценка превышений температуры частей двигателя с использованием упрощенной методики теплового расчета.

Приведенная ниже упрощенная методика теплового расчета базируется на экспериментальных данных большого числа серийных машин.

В расчете кроме оговоренных выше приняты следующие допущения:

1. Потери в активной части статора или ротора отводятся цилиндрической поверхностью сердечников указанных частей двигателя

2. Потери в лобовых частях обмотки статора или ротора отводятся цилиндрической поверхностью лобовых частей обмотки указанных частей двигателя.

3. Электрические потери в меди обмотки и магнитные в стали оказывают одинаковое влияние на превышение температуры обмотки.

С учетом указанных допущений тепловой процесс в статоре и роторе асинхронного двигателя можно представить в следующем виде.

Электрические потери, возникающие в пазовой части обмотки статора или ротора, передаются через тепловое сопротивление изоляции проводов и паза сердечнику, а затем вместе с магнитными потерями, возникающими в стали сердечника, — воздуху внутри двигателя через охлаждаемую поверхность сердечника и поверхность вентиляционных каналов (при их наличии). У статора, кроме того, часть потерь может отводиться непосредственно в окружающую среду через наружную поверхность сердечника статора или станины, если сердечник прилегает

к ней (полностью или частично, через опорные ребра). Сердечник статора или ротора обладает достаточно высокой теплопроводностью в радиальном направлении, поэтому перепадом температуры в стали сердечника можно пренебречь.

Электрические потери, возникающие в лобовых частях обмотки, передаются через тепловое сопротивление изоляции и охлаждаемую поверхность лобовых частей воздуху внутри двигателя.

Для определения превышения температуры в наихудших возможных условиях активные сопротивления обмоток приводят к предельной допускаемой температуре (по ГОСТ 183-74) при выбранном классе нагревостойкости изоляции; удельная электрическая проводимость λ_ϑ для этих температур указана в табл. 14-34.

Таблица 14-34

Значение удельной электрической проводимости γ_ϑ меди обмоток статора и фазного ротора

γ_ϑ, См/мкм, при предельной допускаемой температуре для классов нагревостойкости изоляции		
B	F	H
$\gamma_{130}=40,7$	$\gamma_{140}=38,5$	$\gamma_{165}=36,0$

Чтобы использовать в тепловом расчете сопротивления и потери обмоток, вычисленные ранее при расчетной рабочей температуре (для определения к. п. д. и рабочих характеристик), их необходимо умножить на коэффициент k_ϑ, равный отношению удельной проводимости меди при расчетной рабочей температуре из табл. 14-29 и при максимальной допустимой температуре из табл. 14-34.

При изоляции класса B $k_\vartheta=\gamma_{75}/\gamma_{130}=1,15$, при изоляции класса F $k_\vartheta=\gamma_{115}/\gamma_{140}=1,07$ и при изоляции класса H $k_\vartheta=\gamma_{115}/\gamma_{165}=1,145$.

Принимая во внимание упрощенность метода теплового расчета, а также влияние технологических факторов, электромагнитные нагрузки следует выбирать с учетом запаса по превышению температуры не менее 10%.

Для двигателей, требующих повышенной надежности в эксплуатации, допускаемые превышения температуры в некоторых случаях снижают. Так, возможно применение изоляции класса нагревостойкости F с допускаемым превышением температуры, соответствующим классу нагревостойкости B при учете 10%-ного запаса по превышению температуры.

б) Обмотка статора

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя, °C,

$$\Delta\vartheta_{п1}=k\frac{k_\vartheta P_{м1}(2l_1/l_{ср1})+\Sigma P_c}{\pi D_1 l_1 \alpha_1}, \qquad (14\text{-}307)$$

где α_1 — коэффициент теплопроводности с поверхности сердечника статора, Вт/(мм$^2\cdot$°C), средние значения α_1 приведены на рис. 14-31; k — коэффициент, учитывающий долю потерь в сердечнике статора, передаваемых воздуху внутри двигателя (табл. 14-35).

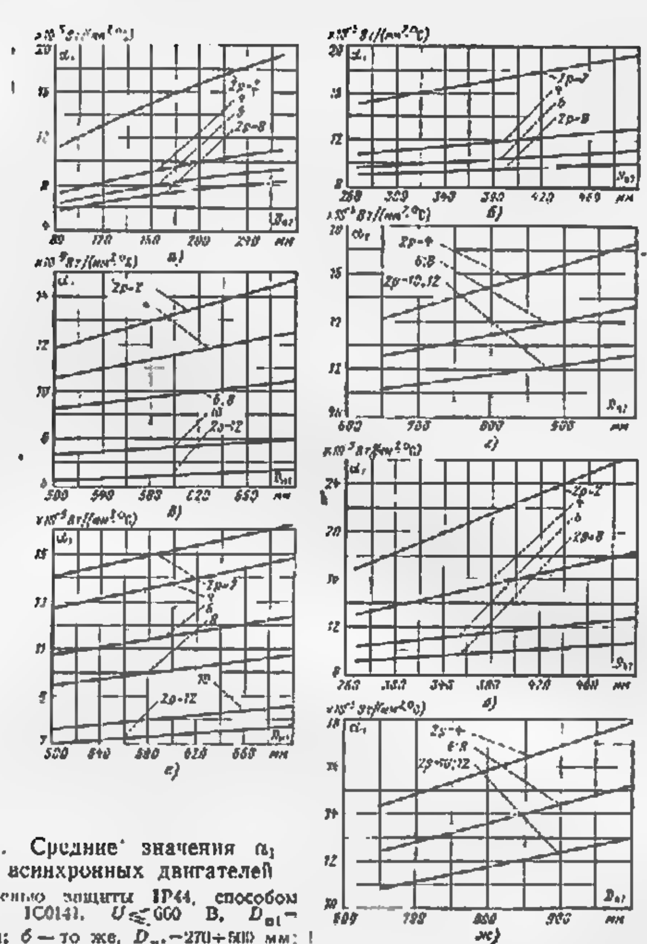


Рис. 14-31. Средние значения $\alpha_1 = f(D_{н1})$ асинхронных двигателей

а — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, $U \leq 660$ В, $D_{н1} = 85 \div 270$ мм; *б* — то же, $D_{н1} = 270 \div 500$ мм; *в* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141 с продуваемым ротором, $U \leq 660$ В, $D_{н1} = 500 \div 700$ мм; *г* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0151, $U = 6000$ В, $D_{н1} = 650 \div 1000$ мм; *д* — со степенью защиты IP23, способом охлаждения IC01, $U \leq 660$ В, $D_{н1} = 270 \div 500$ мм; *е* — то же, $D_{н1} = 500 \div 700$ мм; *ж* — то же, $U = 6000$ В, $D_{н1} = 650 \div 1000$ мм.

Таблица 14-35

Средние значения коэффициента k

Исполнение двигателя по степени защиты	Значения коэффициента k при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,8	0,78	0,76	0,74	0,72

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, °C,

$$\Delta\vartheta_{\text{и}1} = \frac{k_\vartheta P_{\text{м}1}(2l_1/l_{\text{ср}1})}{Z_1 \Pi_1 l_1}\left(\frac{b_{\text{и}1}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_{\text{п}1}+b_{\text{п}2}}{16\lambda'_{\text{экв}}}\right), \tag{14-308}$$

где Π_1 — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза статора, мм:

для трапецеидальных полузакрытых пазов

$$\Pi_1 = 2h_{\text{п}1} + b_{\text{п}1} + b_{\text{п}2},$$

для прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов

$$\Pi_1 = 2(h_{\text{п}1} + b_{\text{п}1});$$

$b_{\text{и}1}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу статора, мм; при полузакрытых пазах значение $b_{\text{и}1}$ принимают по табл. 14-14, а при полуоткрытых и открытых пазах

$$b_{\text{и}1} = (b_{\text{п}1} - N_{\text{ш}} b)/2;$$

здесь $N_{\text{ш}}$ — число проводников по ширине паза; $\lambda_{\text{экв}}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции обмотки в пазу, учитывающий воздушные прослойки; для изоляции классов нагревостойкости B, F и H среднее значение $\lambda_{\text{экв}} = 16 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм·°C); $\lambda'_{\text{экв}}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушки из круглого провода (по рис. 14-32).

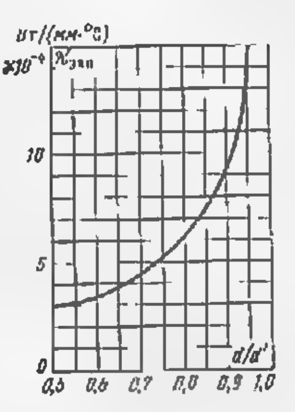


Рис. 14-32. Средние значения $\lambda'_{\text{экв}} = f(d/d')$.

Для обмоток статоров из жестких катушек или полукатушек второй член, указанный в скобках формулы (14-308), принимается равным нулю.

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя, °C,

$$\Delta\vartheta_{\text{л}1} = \frac{k k_\vartheta P_{\text{м}1}(2l_{\text{л}1}/l_{\text{ср}1})}{2\pi D_1 l_{\text{в}1} \alpha_1}. \tag{14-309}$$

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора, °C,

$$\Delta\vartheta_{\text{и.л}1} = \frac{k_\vartheta P_{\text{м}1}(2l_{\text{л}1}/l_{\text{ср}1})}{2Z_1 \Pi_{\text{л}1} l_{\text{л}1}}\left(\frac{b_{\text{и.л}1}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{п}1}}{12\lambda'_{\text{экв}}}\right), \tag{14-310}$$

где $\Pi_{\text{л}1}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения одной катушки в лобовой части, мм:

для трапецеидальных полузакрытых пазов

$$\Pi_{\text{л}1} \approx 2h_{\text{п}1} + b_{\text{п}1} + b_{\text{п}2};$$

для прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов

$$\Pi_{\text{л}1} \approx 2(h_{\text{п}1} + b_{\text{п}1});$$

$b_{\text{и.л}1}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части, мм; значение $b_{\text{и.л}1}$ принимают в соответствии с табл. 9-4 и 9-6.

Для обмоток, не имеющих изоляции лобовых частей катушек, первый член, указанный в скобках формулы (14-310), принимают равным

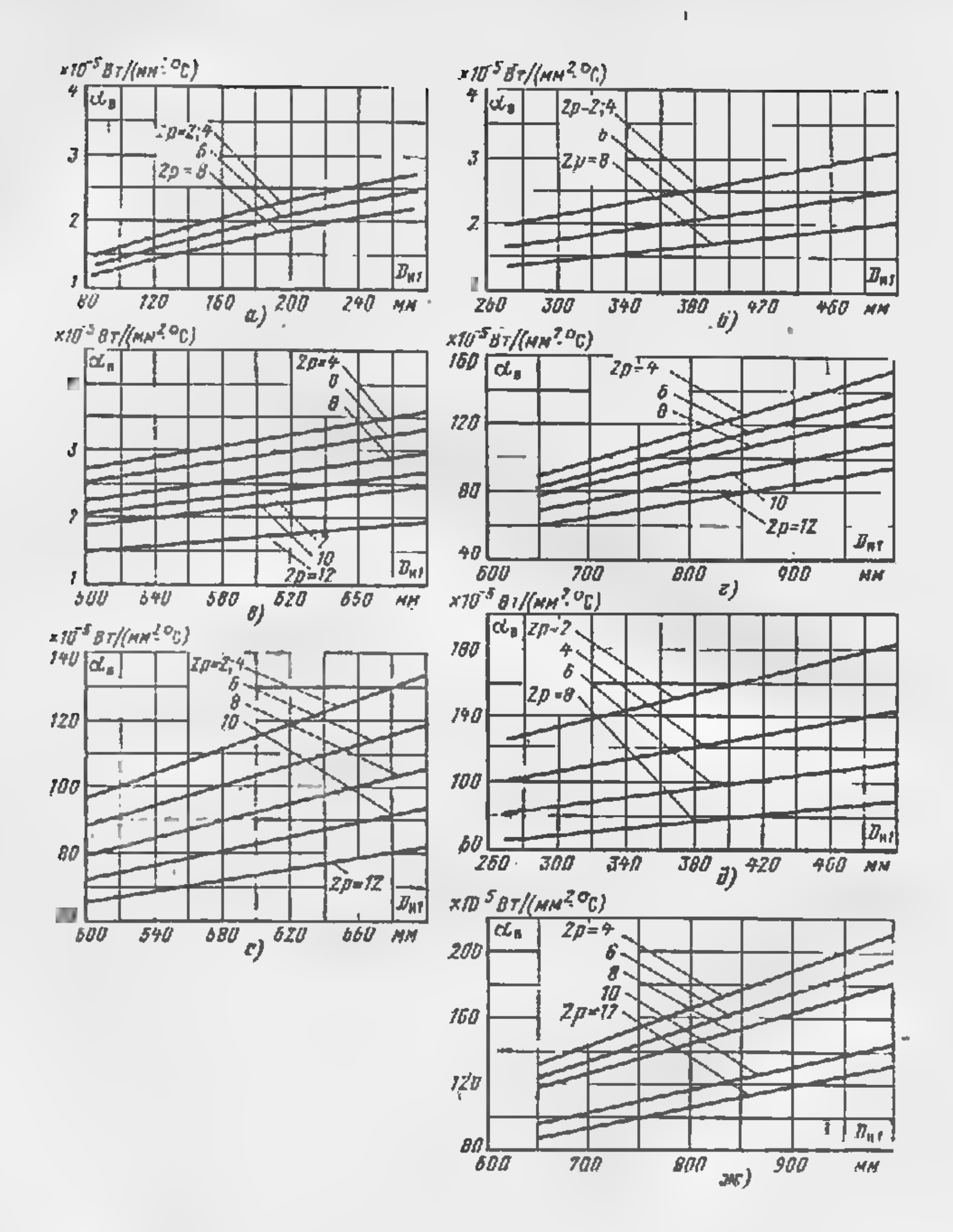


Рис. 14-33. Средние значения $\alpha_в = f(D_{н1})$ асинхронных двигателей.

а — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=85 \div 270$ мм; *б* — то же, $D_{н1}=280 \div 500$ мм; *в* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141 с продуваемым ротором, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=500 \div 700$ мм; *г* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0151, $U=6000$ В, $D_{н1}=650 \div 1000$ мм, *д* — со степенью защиты IP23, способом охлаждения IC01, $U \leq 660$ В, $D_{н1}=270 \div 500$ мм; *е* — то же, $D_{н1}=500 \div 700$ мм, *ж* — то же, $U=6000$ В, $D_{н1}=650 \div 1000$ мм

нулю. Второй член, указанный в скобках формулы (14-310), рассчитывают только для статоров с полузакрытыми пазами и всыпной обмоткой из круглых проводов; для статоров с открытыми или полуоткрытыми пазами этот член принимают равным нулю.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя, °С,

$$\Delta\vartheta'_1=(\Delta\vartheta_{п1}+\Delta\vartheta_{и1})\frac{2l_1}{l_{ср1}}+(\Delta\vartheta'_{п.л1}+\Delta\vartheta_{и.л1})\frac{2l_{л1}}{l_{ср1}}. \qquad (14\text{-}311)$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_в=\Sigma P'/S_{дв}\alpha_в, \qquad (14\text{-}312)$$

где $\Sigma P'$ — сумма всех потерь двигателя при предельной допускаемой температуре, Вт, за исключением:

для двигателей со степенью защиты IP23 — доли потерь в статоре, передаваемых через наружную поверхность сердечника; эта доля потерь равна:

$$(1-k)\left(P_{м1}k_\vartheta\frac{2l_1}{l_{ср1}}+\Sigma P_с\right),$$

где k — коэффициент, определяется по табл. 14-35;

для двигателей со степенью защиты IP44, кроме того, исключают мощность, потребляемую наружным вентилятором, которую принимают примерно равной $0{,}9\Sigma P_{мх}$; $\Sigma P_{мх}$ определяют по (14-229);

$S_{дв}$ условная поверхность охлаждения двигателя, мм².

для двигателей со степенью защиты IP23

$$S_{дв}=\pi D_{н1}(l_1+2l_{в1}),$$

для двигателей со степенью защиты IP44 с охлаждающими ребрами на станине

$$S_{дв}=(\pi D_{н1}+8n_рh_р)(l_1+2l_{в1}),$$

где $n_р$ и $h_р$ — число и высота ребер по рис. 9-16; $\alpha_в$ — коэффициент подогрева воздуха, Вт/(мм²·°С); средние значения $\alpha_в$ приведены на рис. 14-33.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_1=\Delta\vartheta'_1+\Delta\vartheta_в. \qquad (14\text{-}313)$$

Тепловой расчет двигателей в исполнении IP44 с сосредоточенным или распределенным воздухоохладителем (способ охлаждения IC0451) проводят так же, как и двигателей в исполнении IP23, с учетом того, что циркулирующий внутри машины воздух непрерывно охлаждается за пределами внутренней полости машины в воздухоохладителе Из суммы потерь необходимо дополнительно исключить мощность, потребляемую наружным вентилятором и равную $(n/1000)^2(0{,}6D_{н1}/100)^4$ [см. (14-229а)].

в) Обмотка фазного ротора

Превышение температуры поверхности охлаждения сердечника ротора над температурой воздуха внутри двигателя, °С,

$$\Delta\vartheta_{п2}=\frac{k_{\vartheta}P_{м2}\,(2l_2/l_{ср2})}{\pi D_{н2}l_2\alpha_2}, \qquad (14\text{-}314)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника ротора, Вт/(мм²·°С); средние значения α_2 приведены на рис. 14-34.

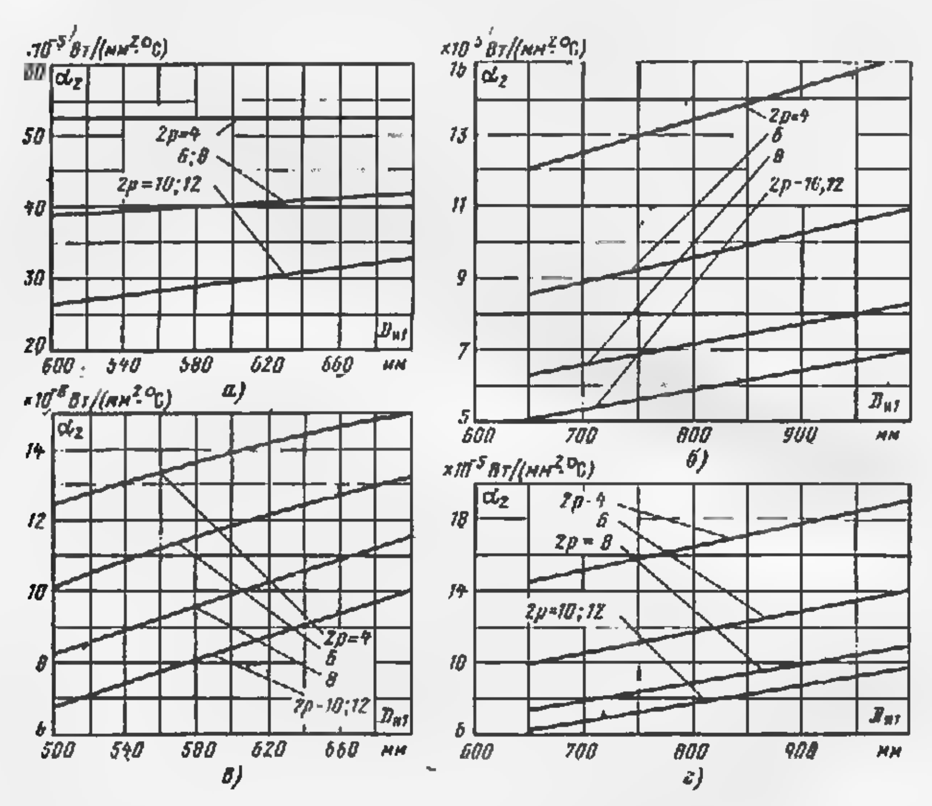


Рис. 14-34. Средние значения $\alpha_2=f(D_{н1})$ асинхронных двигателей

а — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141 с продуваемым ротором, $U\leq660$ В, $D_{н1}=500\div700$ мм; б — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0151, $U=6000$ В, $D_{н1}=650\div1000$ мм; в — со степенью защиты IP23, способом охлаждения IC01, $U\leq660$ В, $D_{н1}=500\div700$ мм; г — то же, $U=6000$ В, $D_{н1}=650\div1000$ мм.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки ротора, °С,

$$\Delta\vartheta_{из}=\frac{k_{\vartheta}P_{м2}\,(2l_2/l_{ср2})\,b_{и2}}{Z_2\Pi_2 l_2\lambda_{экв}}, \qquad (14\text{-}315)$$

где Π_2 — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза ротора, мм,

$$\Pi_2=2(h_{п2}+b_{п2});$$

$b_{и2}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу ротора, мм,

$$b_{и2}=(b_{п2}-N_{ш}b)/2.$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки ротора над температурой воздуха внутри двигателя, °C,

$$\Delta\vartheta_{п.л2}=\frac{k_{\vartheta}P_{м2}(2l_{л2}/l_{ср2})}{2\pi D_{н2}l_{в2}\alpha_2}. \qquad (14\text{-}316)$$

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки ротора, °C,

$$\Delta\vartheta_{из.л2}=\frac{k_{\vartheta}P_{м2}(2l_{л2}/l_{ср})}{2Z_2\Pi_{л2}l_{л2}}\frac{b_{и.л2}}{\lambda_{экв}}, \qquad (14\text{-}317)$$

где $\Pi_{л2}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения одной секции в лобовой части, мм,

$$\Pi_{л2}=2(h_{п2}+b_{п2});$$

$b_{и.л2}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части, мм; значения $b_{и.л2}$ принимают по табл. 9-8.

Среднее превышение температуры обмотки ротора над температурой воздуха внутри двигателя, °C,

$$\Delta\vartheta'_2=(\Delta\vartheta_{п2}+\Delta\vartheta_{и2})\frac{2l_\delta}{l_{ср2}}+(\Delta\vartheta_{п.л2}+\Delta\vartheta_{из.л2})\frac{2l_{л2}}{l_{ср2}}. \qquad (14\text{-}318)$$

Среднее превышение температуры обмотки ротора над температурой охлаждающей среды, °C,

$$\Delta\vartheta_2=\Delta\vartheta'_2+\Delta\vartheta_в, \qquad (14\text{-}319)$$

где $\Delta\vartheta_в$ — определяется по (14-312).

14-15. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИИ

Двигатели со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01 выполняют, как правило, с радиальной вентиляцией (см. § 3-2). Нагнетательными элементами служат лопатки роторов, лобовые части обмотки фазного ротора, вылеты стержней сварной клетки короткозамкнутого ротора, вентиляционные распорки, расположенные в радиальных каналах сердечников роторов двигателей большой мощности.

Необходимое количество воздуха, м³/с,

$$Q_в=\frac{\Sigma P'}{1100\Delta\vartheta'_в}, \qquad (14\text{-}320)$$

где $\Delta\vartheta'_в$ — превышение температуры выходящего из двигателя воздуха над входящим, °C; $\Delta\vartheta'_в=2\Delta\vartheta_в$, где $\Delta\vartheta_в$ — среднее превышение температуры воздуха в двигателе, определяемое при тепловом расчете в § 14-14.

Ниже приводятся эмпирические зависимости, которые дают возможность приближенно оценить параметры нагнетательных элементов.

Расход воздуха, обеспечиваемый нагнетательными элементами, м³/с,

$$Q_в=m(n_кl_к+100)\frac{n}{1000}\left(\frac{D_{н2}}{100}\right)^2\cdot 10^{-4}, \qquad (14\text{-}321)$$

где при $2p=2$ коэффициент $m=2{,}6$, а при $2p=4$; 6; 8; 10 $m=3{,}15$; $n_к$ и $l_к$ — число и длина радиальных вентиляционных каналов; при их отсутствии первый член в скобках равен нулю.

Полученное по (14-321) значение $Q_в$ должно быть не менее рассчитанного по (14-320).

Напор, Па,

$$H=7{,}85(n/1000)^2(D_{н2}/100)^2. \qquad (14\text{-}322)$$

Мощность, расходуемая на радиальную вентиляцию, может быть с достаточным приближением принята равной механическим потерям, которые определяют по (14-227) или (14-228).

Для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141, с наружным обдувом центробежным вентилятором необходимое количество воздуха, м³/с,

$$Q_в=\frac{\Sigma P m \sqrt{(n/1000)(D_{н1}/100)}}{1100\Delta\vartheta_в}, \qquad (14\text{-}323)$$

где $\Delta\vartheta_в$ — превышение температуры корпуса, условно принимаемое равным превышению температуры воздуха внутри двигателя, °С; $m\sqrt{(n/1000)(D_{н1}/100)}$ — поправочный коэффициент, учитывающий изменение условий теплоотдачи по длине корпуса; значения m зависят от высоты оси вращения и числа полюсов двигателя:

h, мм	$2p$	m
56—132	2	2,6
56—132	4; 6; 8	1,8
160—400	2	3,3
160—400	4; 6; 8; 10; 12	2,5

Ниже приводятся эмпирические зависимости, которые дают возможность приближенно оценить напор и расход охлаждающего воздуха двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 при размерах вентилятора, числе и размерах охлаждающих ребер, рекомендованных в гл. 9.

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, м³/с,

$$Q_в=0{,}6\frac{n}{1000}\left(\frac{D_{н1}}{100}\right)^3\cdot 10^{-2}. \qquad (10\text{-}323а)$$

Полученные по (14-323а) значения $Q_в$ должны быть не менее рассчитанных по (14-323).

Напор, Па,

$$H=12{,}3(n/1000)^2(D_{н1}/100)^2. \qquad (14\text{-}323б)$$

Мощность, расходуемая на вентиляцию, может быть с достаточным приближением принята равной $0{,}9\Sigma P_{мх}$; $\Sigma P_{мх}$ определяют по (14-229) или (14-229а).

14-16. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

а) Определение допустимого числа пусков и реверсов в 1 ч при холостом ходе двигателя

Приближенное значение числа пусков в 1 ч при холостом ходе двигателя

$$h_{0п}=3600(\Sigma P_н/\Sigma P_0), \qquad (14\text{-}324)$$

где $\Sigma P_н$ — суммарные потери двигателя при номинальном продолжительном режиме работы (§ 14-10), Вт; ΣP_0 — суммарные потери двигателя за один пуск при холостом ходе, Вт·с,

$$\sum P_0 = \frac{J}{180} \frac{n_c^2}{1000} \left[1 + \frac{P_{м1}(I_п/I_1)^2(1-s_н)}{P_2(M_п/M_в)}\right] \cdot 10^3,$$

n_c — синхронная частота вращения, об/мин; P_2 — номинальная мощность, Вт; $P_{м1}$ — потери в обмотке статора при номинальной нагрузке и продолжительном режиме работы, Вт; J — динамический момент инерции, кг·м².

Допустимое число реверсов в 1 ч при холостом ходе

$$h_{0р} \approx 0{,}3 h_{0п}. \qquad (14\text{-}325)$$

б) Динамический момент инерции ротора

Приближенное значение динамического момента инерции ротора, кг·м²,

$$J = k_{м.и} D^4_{н2} l_2 \cdot 10^{-12}, \qquad (14\text{-}326)$$

где $k_{м.и}$ принимает следующие значения в зависимости от числа полюсов:

$2p$	2	4	6; 8	10; 12
$k_{м.и}$	0,78	0,73	0,68	0,65

Точное значение динамического момента инерции ротора может быть определено расчетом моментов инерции входящих в него отдельных деталей.

14-17. МАССА ДВИГАТЕЛЕЙ

Уточненную массу деталей, сборочных единиц и всего двигателя в целом определяют после окончания проектирования по разработанным чертежам. Предварительные значения массы, необходимые для оценки экономической эффективности спроектированного варианта двигателя, могут быть рассчитаны по приведенным ниже формулам.

Масса изолированных проводов обмотки статора, кг:

круглого поперечного сечения

$$G_{м1} = \left[7{,}55 + 1{,}35\left(\frac{d'}{d}\right)^2\right] Z_1 \frac{N_{п1}}{2} l_{ср1} cq \cdot 10^{-6}; \qquad (14\text{-}327)$$

прямоугольного поперечного сечения

$$G_{м1} = \left(7{,}55 + 1{,}35 \frac{q'}{q}\right) Z_1 \frac{N_п}{2} l_{ср1} cq \cdot 10^{-6}, \qquad (14\text{-}328)$$

где $q' = h'b'$.

Масса алюминия короткозамкнутого ротора с литой или сварной клеткой, кг,

$$G_{ал2} = 2{,}7\left[Z_2 q_{ст} l_2 + 2\pi D_{кл.ср} q_{кл} + 1{,}1 N_л (l_л - l_{кл}) h_л b_л\right] 10^{-6}. \qquad (14\text{-}329)$$

Масса неизолированных проводов обмотки фазного ротора, кг,

$$G_{м2}=8,9Z_2(N_{к2}/2)\,l_{ср2}q\cdot 10^{-6}. \qquad (14\text{-}330)$$

Масса стали сердечников статора и ротора, кг,

$$\sum G_c=7,8l_{ст1}\left[0,785(D^2_{н1}-D^2_2)-Z_1Q_{п1}-Z_2Q_{п2}-\frac{\pi d^2_{к2}}{4}n_{к2}\right]\cdot 10^{-6}. \qquad (14\text{-}331)$$

Масса изоляции статора, кг:

с трапецеидальными полузакрытыми пазами

$$G_{и1}=1,35(l_1+20)(2h_{п1}+3b_п)b_иZ_1\cdot 10^{-6}, \qquad (14\text{-}332)$$

где $b_и$ — односторонняя толщина изоляции из табл. 14-14; $b_п$ — средняя ширина паза, мм;

с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами

$$G_{и1}=1,35Z_1[(l_1+20)(b_{и.п.ш}h_{п1}+b_{и.п.в}b_{п1})+l_{л1}(b_{и.л.ш}h_{п1}+b_{и.л.в}b_{п1})]\cdot 10^{-6}, \qquad (14\text{-}333)$$

где $b_{и.п.ш}$ — общая толщина изоляции в пазу по ширине (без витковой, без допуска на укладку и разбухание от пропитки обмоток), мм; $b_{и.п.в}$ — общая толщина изоляции в пазу по высоте (без витковой, без высоты клина и усика паза, без допуска на укладку и разбухание от пропитки обмотки), мм; $b_{и.л.ш}$ и $b_{и.л.в}$ — общая толщина изоляции в лобовой части по ширине и высоте соответственно, мм; значения $b_{и.п.ш}$, $b_{и.п.в}$, $b_{и.л.ш}$ и $b_{и.л.в}$ определяют для полуоткрытых пазов статора из табл. 9-4, а для открытых — из табл. 9-4 и 9-6.

Масса изоляции фазного ротора, кг,

$$G_{и2}=1,35Z_2[(l_2+20)(b_{и.п.ш}h_{п2}+b_{и.п.в}b_{п2})+l_{л2}(b_{и.л.ш}h_{п2}+b_{и.л.в}b_{п2})]\cdot 10^{-6}, \qquad (14\text{-}334)$$

где $b_{и.п.ш}$ — общая толщина изоляции в пазу по ширине, мм; $b_{и.п.в}$ — общая толщина изоляции в пазу по высоте (без высоты клина и усика паза, без допуска на укладку обмотки), мм; $b_{и.л.ш}$ и $b_{и.л.в}$ — общая толщина изоляции в лобовой части по ширине и высоте соответственно, мм; значения $b_{и.п.ш}$, $b_{и.п.в}$, $b_{и.л.ш}$ и $b_{и.л.в}$ определяют из табл. 9-8.

Для предварительной оценки массы конструкционных материалов могут быть с достаточным приближением использованы следующие зависимости.

Для двигателей со степенью защиты IP44, кг:

с высотами оси вращения до 250 мм включительно:

станина и щиты из алюминиевого сплава

$$G_к=(0,26D^2_{н1}l_1+2,8D^3_{н1})\cdot 10^{-6}; \qquad (14\text{-}335а)$$

станина и щиты чугунные

$$G_к=(0,7D^2_{н1}l_1+3,5D^3_{н1})\cdot 10^{-6}; \qquad (14\text{-}335б)$$

с высотами оси вращения 280—400 мм (станина и щиты чугунные):

с короткозамкнутым ротором

$$G_к=(0,7D^2_{н1}l_1+2,9D^3_{н1})\cdot 10^{-6}; \qquad (14\text{-}336а)$$

с фазным ротором

$$G_к=(0,7D^2_{н1}l_1+3,5D^3_{н1})\cdot 10^{-6}; \qquad (14\text{-}336б)$$

с высотами оси вращения свыше 400 мм (сварное исполнение с распределенным трубчатым охладителем):

с короткозамкнутым ротором

$$G_к = 2,2D^2_{н1}l_1 \cdot 10^{-6} + 160D^{1,3}_{н1} \cdot 10^{-3};\qquad (14\text{-}337а)$$

с фазным ротором

$$G_к = 2,2D^2_{н1}l_1 \cdot 10^{-6} + 180D^{1,3}_{н1} \cdot 10^{-3}.\qquad (14\text{-}337б)$$

Для двигателей со степенью защиты IP23, кг:

с высотами оси вращения до 250 мм включительно (станина и щиты — чугунные):

$$G_к = (1,1D^2_{н1}l_1 + 2,2D^3_{н1}) \cdot 10^{-6};\qquad (14\text{-}338)$$

с высотами оси вращения 280, 315 и 355 мм (сварные полустанина и щиты):

с короткозамкнутым ротором

$$G_к = 1,1D^2_{н1}l_1 \cdot 10^{-6} + 13D^{1,6}_{н1} \cdot 10^{-3};\qquad (14\text{-}339а)$$

с фазным ротором

$$G_к = 1,1D^2_{н1}l_1 \cdot 10^{-6} + 15,2D^{1,6}_{н1} \cdot 10^{-3};\qquad (14\text{-}339б)$$

с высотами оси вращения свыше 355 мм (станина, щиты — чугунные):

с короткозамкнутым ротором

$$G_к = 2,3D^2_{н1}l_1 \cdot 10^{-6} + 16D^{1,6}_{н1} \cdot 10^{-3};\qquad (14\text{-}340а)$$

с фазным ротором

$$G_к = 2,3D^2_{н1}l_1 \cdot 10^{-6} + 17D^{1,6}_{н1} \cdot 10^{-3}.\qquad (14\text{-}340б)$$

Масса двигателя, кг:

с короткозамкнутым ротором

$$G_{дв} = G_{м1} + G_{пл2} + \Sigma G_с + G_{и1} + G_к;\qquad (14\text{-}341)$$

с фазным ротором

$$G_{дв} = G_{м1} + G_{м2} + \Sigma G_с + G_{и1} + G_{и2} + G_к.\qquad (14\text{-}342)$$

Глава пятнадцатая

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Данные для проектирования участков серии асинхронных двигателей удобно представлять в виде табл. 15-1.

Общие требования ко всем участкам серии:

1. Двигатели общего назначения.
2. Ротор — короткозамкнутый, с литой алюминиевой клеткой.
3. Номинальный режим работы — продолжительный (S1) по ГОСТ 183-74.
4. Значения к. п. д. и cos φ при номинальном режиме должны приближаться к данным рис. 5-1 и 5-2.
5. Шкала мощностей твердая по ГОСТ 12139-74 для всех чисел полюсов.
6. Исполнение по форме монтажа — М101 (ГОСТ 2479-65).

7. Установочно-присоединительные размеры должны соответствовать ГОСТ 18709-73

8. Станина и щиты литые чугунные для участков № 1 и 2 и стальные сварные для участка № 3

9. Вводное устройство должно быть расположено сверху двигателя для участков № 1 и 2 и сбоку двигателя для участка № 3

Таблица 15-1

Техническое задание для проектирования участков серии асинхронных двигателей

Исходные данные	Условное обозначение участка серии		
	№ 1	№ 2	№ 3
Диапазон мощностей, кВт, при $2p=4$	1,1—4,0	22—45	132—250
Число полюсов	2; 4; 6	2; 4; 6	4; 6; 8
Ориентировочная высота оси вращения, мм	80; 90; 100	180; 200	280; 315
Номинальное напряжение, В	220/380	220/380	380/660
Степень защиты	IP44	IP44	IP23
Класс изоляции по нагревостойкости (с использованием по нагреву)	B	F	F
Способ охлаждения	IC0141	IC0141	IC01
Кратность начального пускового момента (не менее)	2,0	1,4 при $2p=2$ и 4 1,2 при $2p=6$	1,2 при $h=280$ мм 1,0 при $h=315$ мм
Кратность максимального момента (не менее)	2,2	2,2 при $2p=2$ и 4 2,0 при $2p=6$	2,0 при $2p=4$ 1,9 при $2p=6$ и 8
Кратность пускового тока (не более)	7,5	7,5	7,5

10. Двигатели должны иметь один выступающий цилиндрический конец вала, рассчитанный на сочленение с валом рабочего механизма посредством упругой муфты или клиноременной передачи.

11. По климатическим условиям двигатели должны быть в исполнении У при категории размещения 3 (ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70).

12. Показатели надежности и долговечности должны быть следующие: средний срок службы не менее 15 лет при среднем ресурсе не более 40 000 ч, средний ресурс подшипников не менее 12 000 ч, вероятность безотказной работы не менее 0,9 при 10 000 ч наработки.

13. Во всем неоговоренном двигатели должны удовлетворять ГОСТ 183-74.

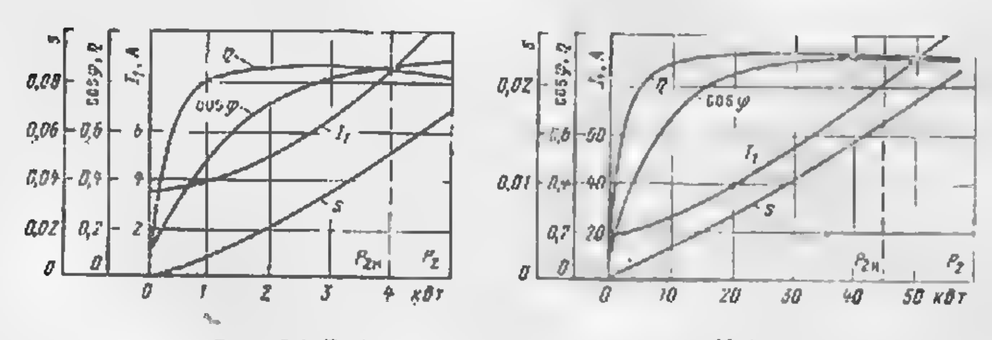


Рис. 15-1. Рабочие характеристики двигателя № 1.

Рис. 15-2. Рабочие характеристики двигателя № 2.

В табл. 15-2—15-4 указаны вычисленные основные размеры сердечников двигателей и предварительные значения мощностей двигателей с разными числами полюсов. Значения к. п. д. и $\cos\varphi$ соответствуют при этом данным рис. 5-1 и 5-2; отношения P_1/P_1 — рис. 14-1.

Результаты расчета сведены в табл. 15-5. В графе двигатель № 1 приводятся данные для двигателя мощности 4 кВт при $2p=4$, в графе «Двигатель № 2» — мощностью 45 кВт при $2p=4$, в графе «Двигатель № 3 — мощностью 250 кВт при $2p=4$.

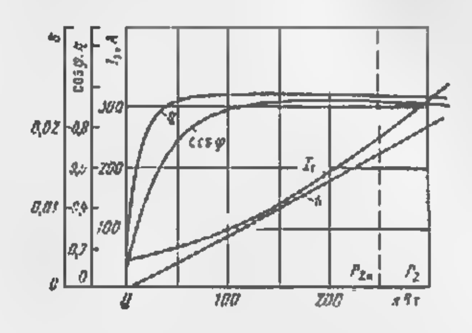


Рис. 15-3. Рабочие характеристики двигателя № 3.

Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 1 представлены в виде табл. 15-6, а сами характеристики показаны на рис. 15-1.

Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 2 представлены в виде табл. 15-7, а сами характеристики показаны на рис. 15-2.

Результаты расчета двигателя № 3 представлены в табл. 15-8, а сами характеристики — на рис. 15-3.

Таблица 15-2

Основные размеры сердечников двигателей участка серии № 1

h, мм	$D_{внеш}$, мм	Нормальная длина сердечника	D_1, мм, при $2p$			P_2, кВт, при $2p$		
			2	4	6	2	4	6
80	139	1	78	88	94	1,5	1,1	0,75
80	139	2	78	88	94	2,2	1,5	1,1
90	157	1	86	100	107	—	—	—
90	157	2	86	100	107	3,0	2,2	1,5
100	175	1	101	112	120	4,0	3,0	—
100	175	2	101	112	120	5,5	4,0	2,2

Продолжение табл. 15-2

η при $2p$			$\cos\varphi$ при $2p$			P_1, кВ·А, при $2p$		
2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,810	0,755	0,700	0,880	0,800	0,730	2,11	1,82	1,47
0,825	0,780	0,725	0,890	0,820	0,750	3,0	2,35	2,02
—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,840	0,805	0,755	0,895	0,830	0,770	4,0	3,30	2,58
0,855	0,820	—	0,900	0,845	—	5,2	4,33	—
0,865	0,840	0,780	0,905	0,855	0,780	7,03	5,56	3,52

Продолжение табл. 15-2

P_1/l'_1, В·А/мм, при 2p			l'_1, мм, при 2p			Принятые значения l'_1, мм при 2p		
2	4	6	2	4	6	2	4	6
32	26	20	66	70	73,5	70	70	75
32	26	20	94	90,5	101	92	92	100
—	—	—	—	—	—	—	—	—
42	35	27	95,5	94,5	95,5	95	95	95
58	47	—	89,5	92	—	90	90	—
58	47	36,5	121	118	96,5	120	120	100

Продолжение табл. 15-2

$\lambda = l'_1/D_{н1}$, при 2p		
2	4	6
0,505	0,505	0,540
0,660	0,660	0,720
—	—	—
0,605	0,605	0,605
0,915	0,515	—
0,685	0,685	0,570

Таблица 15-3

Основные размеры сердечников двигателей участка серии № 2

h, мм	$D_{н1 макс}$, мм	Порядковая длина сердечника	D_1, мм, при 2p			P_2, кВт, при 2p		
			2	4	6	2	4	6
180	322	1	176	183	230	22	22	—
180	322	2	176	183	230	30	30	18,5
200	359	1	197	240	260	37	37	22
200	359	2	197	240	260	45	45	30

Продолжение табл. 15-3

η при 2p			cos φ при 2p			P_1, кВ·А, при 2p		
2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,905	0,900	—	0,920	0,900	—	26,5	27,2	—
0,910	0,910	0,890	0,920	0,905	0,875	35,8	36,4	23,8
0,915	0,915	0,895	0,920	0,905	0,880	44,0	44,7	28,0
0,920	0,920	0,905	0,920	0,910	0,885	58,2	53,6	37,5

Продолжение табл. 15-3

P_1/l'_1, В·А/мм, при 2p			l'_1, мм, при 2p			Принятые значения l'_1, мм, при 2p		
2	4	6	2	4	6	2	4	6
250	205	160	106	133	—	105	135	—
250	205	160	143	178	149	145	180	150
335	270	205	132	166	137	130	165	140
335	270	205	159	199	183	160	210	185

Продолжение табл. 15-3

$\lambda = l'_1/D_н$, при $2p$		
2	4	6
0,326	0,420	—
0,450	0,560	0,465
0,363	0,460	0,390
0,445	0,557	0,515

Таблица 15-4

Основные размеры сердечников двигателей участка [серии № 3

h, мм	$D_{н.макс}$, мм	Порядковая длина сердечника	D_1, мм, при $2p$			P_2, кВт, при $2p$		
			4	6	8	4	6	8
280	520	1	340	370	385	132	90	75
280	520	2	340	370	385	160	110	90
315	590	1	385	420	440	200	132	110
315	590	2	385	420	440	250	160	132

Продолжение табл. 15-4

η при $2p$			$\cos\varphi$ при $2p$			P_1, кВ·А, при $2p$		
4	6	8	4	6	8	4	6	8
0,935	0,927	0,923	0,915	0,900	0,865	154	108	94
0,938	0,930	0,927	0,915	0,900	0,865	187	132	113
0,943	0,935	0,930	0,920	0,903	0,865	230	156	137
0,945	0,938	0,935	0,920	0,903	0,870	288	189	163

Продолжение табл. 15-4

P_1/l'_1, В·А/мм, при $2p$			l'_1, мм, при $2p$			Принятые значения l'_1, мм, при $2p$		
4	6	8	4	6	8	4	6	8
800	595	440	193	182	214	195	185	215
800	595	440	224	222	257	235	225	255
1150	840	625	200	186	220	200	190	220
1150	840	625	250	225	260	250	225	260

Продолжение табл. 15-4

$\lambda = l'_1/D_н$, при $2p$		
4	6	8
0,375	0,355	0,415
0,450	0,433	0,490
0,340	0,322	0,319
0,425	0,382	0,440

Таблица 15-5

Сводные данные электромагнитного, теплового и вентиляционного расчетов, определения динамических параметров, массы отдельных асинхронных двигателей

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
	Исходные данные (задание)				
1	Полезная мощность на валу P_2, кВт	—	4	45	250
2	Число полюсов $2p$	—	4	4	[illegible]
3	Номинальное напряжение U, В	—	220/380	220/380	380/660
4	Высота оси вращения h, мм	—	100	200	315
5	Ротор	—	Короткозамкнутый	Короткозамкнутый	Короткозамкнутый
6	Степень защиты	—	IP44	IP44	IP23
7	Способ охлаждения	—	IC0141	IC0141	IC01
8	Класс нагревостойкости изоляции	—	[illegible]	F	F
	1. Сердечники статора и ротора				
9	Марка стали и ее толщина, мм	Табл. 14-1	2013; 0,5	2013; 0,5	2312; 0,5
10	Коэффициент заполнения сталью сердечника статора k_c	Табл. 14-1	0,97	0,97	0,95
	Коэффициент заполнения сталью сердечника ротора k_c	Табл. 14-1	0,97	0,97	0,97
11	Числа пазов статора и ротора Z_1/Z_2	Табл. 14-2	36/28	48/38	60/70
12	Припуски на сборку сердечников статора и ротора:	Табл. 14-3			
	по ширине паза $b_п$, мм		0,1	0,2	0,3
	по высоте паза $h_п$, мм		0,1	0,2	0,3
	2. Предварительное определение размеров магнитопровода				
13	Коэффициент полезного действия η	Рис. 5-1	0,840	0,920	0,945
14	Коэффициент мощности $\cos\varphi$	Рис. 5-2	0,855	0,910	0,915
15	Подводимая мощность P_1, В·А	Ф-ла (14-1)	$\frac{4000}{0,840 \cdot 0,855} = 5,56 \cdot 10^3$	$53,6 \cdot 10^3$	$288 \cdot 10^3$
16	Наружный диаметр сердечника статора $D_{н1}$, мм	Табл. 14-4 Табл. 14-5	175 —	359 —	— 590

17	Допустимая подводимая мощность, приходящаяся на 1 мм длины сердечника, P_1/l'_1, В·А/мм	Рис 14-1	47	270	1150
18	Длина сердечника статора l'_1, мм	Ф-ла (14-2)	$\frac{5,56\cdot10^3}{47}=118$	190	250
19	Принятое значение длины сердечника статора l'_1, мм	—	120	200	250
20	Отношение длины сердечника к наружному диаметру λ_2	—	$\frac{120}{175}=0,686$	0,557	0,423
21	Предельное значение отношения длины сердечника к наружному диаметру $\lambda_{макс}$	Рис. 14-2	0,775	0,700	0,485
22	Внутренний диаметр сердечника статора D_1, мм	Рис. 14-3	112	240	385
23	Воздушный зазор между статором и ротором δ, мм	Рис. 14-4	0,3	0,7	1,1
24	Наружный диаметр сердечника ротора $D_{н2}$, мм	Ф-ла (14-2а)	112—2·0,3—111,4	238,6	382,8
25	Отношение внутреннего диаметра листов ротора к наружному диаметру сердечника статора k_1	Табл. 14-7	0,23	0,23	0,23
26	Внутренний диаметр листов ротора D_2, мм	Ф-ла (14-3)	0,23·175−40,25≈40	83	135
27	Число аксиальных каналов ротора $n_{к2}$	Табл. 14-8	—	—	12
28	Диаметр аксиальных каналов ротора $d_{к2}$, мм	Табл. 14-8	—	—	32

3. Обмотка статора

а) Тип и число витков обмотки

29	Тип обмотки	Табл. 14-9	Однослойная всыпная концентрическая	Двухслойная, всыпная	Двухслойная из жестких полукатушек
30	Форма пазов статора	Табл. 14-9	Трапецеидальный полузакрытый	Трапецеидальный полузакрытый	Прямоугольный полуоткрытый
31	Число пазов на полюс и фазу q_1	Табл. 14-10	3	4	5

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
32	Шаг обмотки по пазам $y_{п1}$	(14-8) (14-9)	36/4=9 —	— 10	— 12
33	Укорочение шага β	Табл. 14-11	1,000	0,833	0,800
34	Коэффициент распределения $k_{р1}$	Табл. 14-11	0,960	0,958	0,957
35	Коэффициент укорочения $k_{у1}$	Табл. 14-11	1,000	0,966	0,951
36	Обмоточный коэффициент $k_{об1}$	Табл. 14-11	0,960	0,925	0,911
37	Магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ, Т	Рис. 14-7	0,875	0,772	0,835
38	Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре $\Phi_{предв}$, Вб	(14-12)	$\frac{0,875\cdot112\cdot120\cdot10^{-6}}{2}=0,00588$	0,01855	0,04010
39	Коэффициент падения напряжения в обмотке статора $k_н$	Рис. 14-8	0,967	0,978	0,984
40	Предварительное число витков в обмотке фазы $w_{1предв}$	(14-13)	$\frac{0,967\cdot220}{222\cdot0,960\frac{50}{50}\cdot0,00588}=169,5$	56,4	46
41	Предварительное число эффективных проводников в пазу $N_{п1предв}$	(14-14)	$\frac{169,5\cdot1}{2\cdot3}=28,3$	14,1	18,4
42	Число параллельных ветвей обмотки фазы a_1	—	1	2	4
43	Принятое число эффективных проводников в пазу $N_{п1}$	—	28	14	18
44	Уточненное число витков обмотки фазы w_1	Из (14-14)	$\frac{28\cdot2\cdot3}{1}=168$	55	45
45	Эффективное число витков обмотки фазы статора $w_{эф1}$	(14-15)	$0,960\cdot168=161,1$	51,8	41,0
46	Уточненная расчетная длина сердечника статора l'_1, мм	(14-16)	$120\frac{169,5}{168}=121$	201	255,5

47	Принятая длина сердечника статора l'_1, мм	—	120	200	255
48	Отношение подводимой мощности к длине сердечника статора P_1/l'_1, В·А/мм	—	$\frac{5,56 \cdot 10^3}{120} = 46,4$	268	1130
49	Отношение длины сердечника к наружному диаметру λ_2	—	$\frac{120}{175} = 0,686$	0,557	0,432
50	Число радиальных вентиляционных каналов статора $n_{к1}$	—	—	—	—
51	Длина радиального вентиляционного канала статора $l_{к1}$, мм	—	—	—	—
52	Конструктивная длина сердечника статора l_1, мм	(14-4)	120	200	255
53	Длина сердечника ротора l'_2, мм	—	120	200	260
54	Число радиальных вентиляционных каналов сердечника ротора $n_{к2}$	—	—	—	—
55	Длина радиального вентиляционного канала сердечника ротора $l_{к2}$, мм	—	—	—	—
56	Конструктивная длина сердечника ротора l_2, мм	—	120	200	260
57	Уточненное значение магнитного потока в воздушном зазоре Φ, Вб	(14-17)	$0,00588 \frac{169,5}{168} = 0,00593$	0,01868	0,04100
58	Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ, Т	Из (14-12)	$\frac{0,00593 \cdot 2}{112 \cdot 120 \cdot 10^{-6}} = 0,8830$	0,7758	0,8365
59	Номинальный фазный ток $I_{1н}$, А	(14-18)	$\frac{5,56 \cdot 10^3}{3 \cdot 220} = 8,42$	81,2	252,6
60	Линейная нагрузка статора A_1, А/см	(14-19)	$\frac{10 \cdot 28 \cdot 36 \cdot 8,42}{\pi \cdot 112 \cdot 1} = 241,2$	361,8	563,9
61	Уровень линейных нагрузок в двигателях современных серий A_1, А/см	Рис. 14-9	250	362	580

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
62	Эффективная длина сердечника статора $l_{эф}$, мм	—	$0{,}97\cdot120=116{,}4$	194,0	242,2
63	Предварительное значение магнитной индукции в спинке статора B_{c1}, Т	Табл. 14-12	1,550	1,525	1,525
64	Расчетная высота спинки статора h_{c1}, мм	(14-20)	$\frac{0{,}00593\cdot10^{6}}{2\cdot116{,}4\cdot1{,}550}=16{,}4$	31,6	55,5
65	Высота паза статора $h_{п1}$, мм	(14-21)	$\frac{175-112}{2}-16{,}4=15{,}1$	27,9	47,0
66	Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора t_1, мм	(14-22)	$\frac{\pi\cdot112}{36}=9{,}77$	15,71	20,16
	б) Размеры трапецеидальных полузакрытых пазов и круглых проводников обмотки статора				
67	Предварительное значение магнитной индукции в расчетном сечении зубца B_{z1}, Т	Табл. 14-13	1,750	1,775	—
68	Ширина зубца с равновеликим сечением b_{z1}, мм	(14-23)	$\frac{9{,}77\cdot0{,}8930}{0{,}97\cdot1{,}750}=5{,}08$	7,08	—
69	Бóльшая ширина паза b_1, мм	(14-24)	$\frac{\pi(112+2\cdot15{,}1)}{36}-5{,}08\approx7{,}3$	12,3	—
70	Ширина шлица паза $b_ш$, мм	Табл. 14-16	3,5	3,7	—
71	Высота шлица паза $h_ш$, мм	—	0,5	1,0	—
72	Меньшая ширина паза b_2, мм	(14-25)	$\frac{\pi(112+2\cdot0{,}5-3{,}5)-36\cdot5{,}08}{36-\pi}=4{,}9$	9,1	—
73	Площадь поперечного сечения паза в штампе $Q_{п}$, мм²	(14-26)	$\frac{7{,}3+4{,}9}{2}\left(15{,}1-0{,}5-\frac{4{,}9-3{,}5}{2}\right)=87{,}8$	258,9	—

74	Площадь поперечного сечения паза в свету $Q'_{п}$, мм²	(14-27)	$\left(\frac{7,3+4,9}{2}-0,1\right)\left(15,1-0,5-\frac{4,9-3,5}{2}-0,1\right)=82,8$	252,0	—
75	Площадь поперечного сечения корпусной изоляции $Q_{и}$, мм²	(14-29)	$0,25(2\cdot15,1+7,3+4,9)=10,6$	30,9	—
76	Односторонняя толщина корпусной изоляции $b_{и}$, мм	Табл. 14-14	0,25	0,40	—
77	Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой $Q''_{п}$, мм²	(14-28)	$82,8-10,6-4,0=68,2$	203,1	—
78	Максимально допустимый диаметр изолированного проводника d', мм	(14-33)	$\sqrt{\frac{0,75\cdot68,2}{28}}=1,351$	3,310	—
79	Число элементарных проводников в одном эффективном c	—	1	4	2
80	Диаметр голого провода d, мм	Приложение 30	1,25	1,56	—
81	Диаметр изолированного провода d', мм	То же	1,33	1,64	—
82	Площадь поперечного сечения голого провода q, мм²	» »	1,227	1,911	—
83	Коэффициент заполнения паза $k_{п}$	(14-34)	$\frac{1\cdot28\cdot1,33}{68,2}=0,726$	0,742	—

в) Размеры прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов и прямоугольных проводников обмотки статора

84	Предварительное значение магнитной индукции в наиболее узком месте зубца $B_{з\,макс}$, Т	Табл. 14-18	—	—	1,9
85	Ширина зубца в наиболее узком месте $b_{з\,мин}$, мм	(14-41)	—	—	$\frac{20,16\cdot0,9365}{0,95\cdot1,9}=9,34$
86	Высота клина $h_{к}$, мм	Табл. 14-20	—	—	3,0
87	Высота шлица $h_{ш}$, мм		—	—	1,0
88	Ширина паза в штампе, $b_{п1}$, мм	(14-42)	—	—	$\frac{\pi(385+2\cdot1,0+2\cdot3,0)}{60}-9,34\approx11,2$

Продолжение табл. 15-5

№ п/п	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
89	Контрольные значения ширины паза в штампе $b_{п.контр}$, мм	—	—	—	$(0,46 \div 0,53) \cdot 20,6 = 9,5 \div 10,9$
90	Предварительное значение ширины паза в штампе (с учетом контрольных значений) $b_{п1}$, мм	—	—	—	10
91	Общая толщина изоляции в пазу по высоте $h_{и}$, мм	Табл. 14-19	—	—	4,5
92	Общая толщина изоляции в пазу по ширине $b_{и}$, мм	То же	—	—	2,2
93	Число проводников по высоте паза $N_{в}$	—	—	—	18
94	Число проводников по ширине паза $N_{ш}$	—	—	—	2
95	Допустимая высота проводника с витковой изоляцией h', мм	(14-44)	—	—	$\frac{47-4,5-3,0-1,0-0,3}{18} = 2,12$
96	Допустимая ширина проводника с витковой изоляцией b', мм	(14-45)	—	—	$\frac{10-2,2-0,3}{2} = 3,75$
97	Размеры голого провода $a \times b$, мм	Приложение 31	—	—	$1,80 \times 3,75$
98	Размеры изолированного провода $h' \times b'$, мм	То же	—	—	$1,95 \times 3,90$
99	Площадь поперечного сечения провода q, мм²	То же	—	—	6,387
100	Высота паза в штампе $h_{п1}$, мм	(14-47)	—	—	$18 \cdot 1,95 + 4,5 + 3,0 + 1,0 + 0,3 = 43,9$
101	Ширина паза в штампе $b_{п1}$, мм	(14-48)	—	—	$2 \cdot 3,9 + 2,2 + 0,3 = 10,3$
102	Ширина шлица полуоткрытого паза в штампе $b_{ш1}$, мм	—	—	—	$0,6 \cdot 10,3 = 6,2$
103	Плотность тока в обмотке статора J_1, А/мм²	(14-35)	$\frac{8,42}{1 \cdot 1,227 \cdot 1} = 6,86$	5,31	4,94

104	Характеристика тепловой нагрузки $A_1 J_1$, А²/(см·мм²)		241,2·6,86=1655	[redacted]	[redacted]
105	Допустимые значения характеристики тепловой нагрузки $A_1 J_1$, А²/(см·мм²)	Рис. 14-11 Табл. 14-17	1820	1875	3020
106	Среднее зубцовое деление статора $t_{ср}$, мм	—	$\frac{\pi(112+15,1)}{36}=11,1$	17,5	22,5
107	Средняя ширина катушки обмотки статора $b_{ср}$, мм	(14-36)	11,1·9=99,9	175,0	269,5
108	Средняя длина лобовой части обмотки $l_{л1}$, мм	(14-37)	(1,16+0,14·2)·99,9+15≈159	267	—
		(14-49)	—	—	$\frac{269,5}{\sqrt{1-\left(\frac{10,3+3,5}{20,16}\right)^2}}+$ $+43,9+50=465$
109	Средняя длина витка обмотки $l_{ср1}$, мм	(14-38)	2(120+159)=558	934	1440
110	Длина вылета лобовой части обмотки $l_{в1}$, мм	(14-39)	(0,19+0,1·2)99,9+10≈49	—	—
		(14-40)	—	(0,12+0,15·2)× ×175,0+10=84	—
	—	(14-51)	—	—	$\frac{\frac{269,5}{2}\cdot\frac{10,3+3,5}{20,16}}{\sqrt{1-\left(\frac{10,3+3,5}{20,16}\right)^2}}+$ $+\frac{43,9}{2}+25=174$

4. Обмотки короткозамкнутого ротора

а) Форма пазов ротора

111	Форма пазов ротора	Табл. 14-21	Рис. 14-12, *а*	Рис. 14-12, *б*	Рис. 14-12, *в*
112	Зубцовое деление по наружному диаметру ротора t_2, мм	(14-53)	$\frac{\pi\ 111,4}{28}=12,50$	19,70	17,18

б) Размеры овальных полузакрытых и закрытых пазов ротора

113	Высота шлица $h_ш$, мм	—	0,5	0,7	—
114	Ширина шлица $b_ш$, мм	—	1,0	1,5	—
115	Высота мостика h_2, мм	—	—	0,3	—

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
116	Больший радиус r_1, мм	(14-55)	2,4	4,1	—
117	Высота паза $h_{п2}$, мм	Рис. 14-13	18	[illegible]	—
118	Расчетная высота спинки ротора h_{c2}, мм	(14-57)	$\frac{2+2}{3,2\cdot 2}\left(\frac{111,4}{2}-18\right)-\frac{2}{3}\times$ $\times 0=23,56$	45,81	—
119	Эффективная длина пакета ротора $l_{эф2}$, мм	—	$0,97\cdot 120=116,4$	194,0	—
120	Магнитная индукция в спинке ротора B_{c2}, Т	(14-56)	$\frac{0,00593\cdot 10^6}{2\cdot 116,4\cdot 23,56}=1,08$	1,05	—
121	Наибольшее допустимое значение магнитной индукции в спинке ротора $B_{c2макс}$, Т	Табл. 14-23	1,25	1,25	—
122	Меньший радиус r_2, мм		Принимаем 1,0	Принимаем 2,0	—
123	Расстояние между центрами радиусов h_1, мм	(14-60)	$18-0,5-0-2,4-1,0=$ $=14,1$	38,9	—
124	Площадь поперечного сечения стержня $q_{ст}$, мм²	(14-61)	$\frac{\pi}{2}(2,4^2+1,0^2)+(2,4+$ $+1,0)\,14,1=58,56$	269,98	—
	в) Размеры бутылочного закрытого паза ротора				
125	Предварительное значение магнитной индукции в нижней части паза $B_{з н2}$, Т	Табл. 14-22	—	—	1,75
126	Ширина зубца в нижней части паза $b_{з н2}$, мм	(14-54)	—	—	$\frac{17,18\cdot 0,8365}{0,97\cdot 1,75}=8,47$
127	Высота верхней части паза h, мм	—	—	—	15
[illegible]	Высота паза $h_{п2}$, мм	Рис. 14-13	—	—	44
129	Расчетная высота спинки ротора h_{c2}, мм	(14-57)	—	—	$\frac{2+2}{3,2\cdot 2}\left(\frac{382,8}{2}-44\right)-\frac{2}{3}\cdot 32=$ $=70,79$

130	Магнитная индукция в спинке ротора B_{c2}, Т	(14-56)	—	—	$\frac{0,04100\cdot 10^4}{2\cdot 252\cdot 70,79}=1,149$
131	Эффективная длина пакета ротора $l_{эф2}$, мм	—	—	—	$260\cdot 0,97=252$
132	Наибольшее допустимое значение индукции в спинке ротора $B_{c2макс}$, Т	Табл. 14-23	—	—	1,35
133	Больший радиус нижней части паза r_1, мм	(14-62)	—	—	$\frac{\pi(382,8-2\cdot 15-2\cdot 0,2)-70\cdot 8,47}{2(70+\pi)}=3,5$
134	Меньший радиус нижней части паза r_2, мм	(14-63)	—	—	$\frac{\pi(382,8-2\cdot 44)-(70\cdot 8,47)}{2(70-\pi)}=2,5$
135	Расстояние между центрами радиусов h_1, мм	(14-64)	—	—	$44-0,2-15-3,5-2,5=22,8$
136	Площадь поперечного сечения нижней части стержня $q_{ст н}$, мм²	(14-65)	—	—	$\frac{\pi}{2}(3,5^2+2,5^2)+(3,5+2,5)\times 22,8=165,86$
137	Ширина верхней части стержня b, мм	—	—	—	4,2
138	Площадь поперечного сечения верхней части стержня $q_{ст в}$, мм²	(14-66)	—	—	$4,2(15-0,11\cdot 4,2)=61,06$
139	Общая площадь поперечного сечения стержня $q_{ст}$, мм²	(14-67)	—	—	$165,86+61,06=226,92$

г) Размеры короткозамыкающего кольца

140	Предварительное поперечное сечение кольца литой клетки $q_{кл}$, мм²	(14-75)	$0,35\frac{28\cdot 58,56}{4}\approx 143,5$	898	1410
141	Высота кольца $h_{кл}$, мм	(14-77)	$1,25\cdot 18\approx 23$	58	55
142	Длина кольца $l_{кл}$, мм	(14-79)	6,5	16	26
143	Принятое поперечное сечение кольца литой клетки $q_{кл}$, мм²	—	$23\cdot 6,5=149,5$	929	1430
144	Средний диаметр кольца $D_{кл ср}$, мм	(14-80)	$111,4-23=88,4$	180,6	327,8

Продолжение табл. 15-5

№ п/п	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
	5. Расчетные параметры двигателя				
145	Удельная проводимость меди обмотки статора при расчетной температуре $\gamma_{\vartheta 1}$, См/мкм	Табл. 14-29	47	41	41
146	Удельная проводимость алюминия обмотки ротора при рабочей температуре $\gamma_{\vartheta 2}$, См/мкм	То же	21,5	20,5	20,5
	а) Параметры обмотки статора				
147	Активное сопротивление обмотки фазы r_1, Ом	(14-97)	$\frac{168\cdot558}{47\cdot1\cdot1\cdot1{,}227\cdot10^3}=1{,}6255$	0,0834	0,0310
148	Активное сопротивление обмотки фазы r_{1*}, о. е.	(14-98)	$\frac{1{,}6255\cdot8{,}42}{220}=0{,}0622$	0,0307	0,0206
149	Коэффициент влияния укорочения шага на пазовое рассеяние k'_β	Рис. 14-19	1	0,875	0,850
150	Коэффициент влияния укорочения шага на пазовое рассеяние k_β	Рис. 14-19	1	0,906	0,867
151	Коэффициент проводимости рассеяния пазов $\lambda_{п1}$	(14-99)	$\frac{12{,}95}{3\cdot1{,}9}1+\left(\frac{0{,}6}{4{,}9}+\frac{3\cdot0{,}7}{4{,}9+2\cdot3{,}5}+\frac{0{,}5}{3{,}5}\right)1=1{,}322$	1,267	—
		(14-100)	—	—	$\frac{36{,}5-1{,}4}{3\cdot10{,}3}\cdot0{,}887+\left(\frac{1{,}25}{10{,}3}+\frac{3\cdot3}{10{,}3+2\cdot6{,}2}+\frac{1{,}0}{6{,}2}\right)\cdot0{,}850+\frac{1{,}4}{4\cdot10{,}3}=1{,}618$

152	Коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, k_{p1}	Табл. 14-30	0,93	0,77	0,65
153	Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора, $k_{ш1}$	(14-103)	$1-0,033\cdot\frac{3,5^2}{9,77\cdot 0,3}=0,8610$	0,9589	0,9429
154	Коэффициент дифференциального рассеяния статора $k_{д1}$	Табл. 14-31	0,0141	0,0062	0,0043
155	Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния статора $\lambda_{д1}$	(14-102)	$\frac{0,9(9,77\cdot 0,960)^2\cdot 0,93\cdot 0,8610\cdot 0,0141}{0,3\cdot 1,379}=2,160$	1,090	0,609
156	Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора $\lambda_{л1}$	(14-104)	$0,34\frac{3}{120}(159-0,64\cdot 1,88)=0,873$	1,133	2,070
157	Коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора λ_1	(14-105)	$1,322+2,160+0,873=4,355$	3,490	4,297
158	Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора x_1, Ом	(14-106)	$\frac{1,58\cdot 50\cdot 120\cdot 168^2\cdot 4,355}{2\cdot 3\cdot 10^8}=1,942$	0,216	0,175
159	Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора x_{1*}, о. е.	(14-107)	$\frac{1,942\cdot 8,42}{220}=0,0743$	0,0797	0,1163

б) Параметры обмотки короткозамкнутого ротора

А. Ротор с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами и литой клеткой

160	Активное сопротивление стержня клетки $r_{ст}$, Ом	(14-108)	$\frac{120}{21,5\cdot 58,56\cdot 10^3}\cdot 1=0,9530\cdot 10^{-4}$	$0,3613\cdot 10^{-4}$	—
161	Коэффициент приведения тока кольца к току стержня $k_{пр2}$	(14-116)	$\frac{2\pi\cdot 2}{28}=0,449$	0,331	—
162	Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, $r_{кл}$, Ом	(14-115)	$\frac{88,4}{21,5\cdot 2\cdot 149,5\cdot 0,449\cdot 10^3}=0,3062\cdot 10^{-4}$	$0,1433\cdot 10^{-4}$	—
163	Центральный угол скоса $\alpha_{ск}$, рад	—	$\frac{\pi\cdot 4}{36}=0,349$	—	—

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
164	Коэффициент скоса пазов ротора $k_{ск}$	(14-117)	$\frac{2\sin(0,349/2)}{0,349}=0,9965$	—	—
165	Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора $k_{пр1}$	(14-118)	$\frac{4\cdot 3}{22}\left(\frac{161,1}{0,9965}\right)^2=1,1200\cdot 10^4$	$0,0847\cdot 10^4$	—
166	Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, r'_2, Ом	(14-119)	$1,1200\cdot 10^4(0,9530+$ $+0,3062)\cdot 10^{-4}=1,4103$	0,0427	—
167	Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, r'_{2*}, о. е.	(14-120)	$\frac{1,4103\cdot 8,42}{220}=0,0540$	0,0156	—
168	Коэффициент проводимости рассеяния пазов $\lambda_{п2}$	(14-121)	$\left[\frac{14,1+0,8\cdot 1}{6\cdot 2,4}\left(1-\right.\right.$ $\left.\left.-\frac{\pi\cdot 2,4^2}{2\cdot 58,56}\right)^2+0,66-\right.$ $\left.-\frac{1}{4\cdot 2,4}\right]\cdot 1+\frac{0,5}{1,0}=$ $=1,796$	—	—
		(14-122)	—	$\left[\frac{38,9+0,8\cdot 2,0}{6\cdot 4,1}\left(1-\right.\right.$ $\left.\left.-\frac{\pi 4,1^2}{2\cdot 269,98}\right)^2+0,66-\right.$ $\left.-\frac{1,5}{4\cdot 4,1}\right]\cdot 1+0,3+1,12\times$ $\times\frac{0,3\cdot 10^3}{616,4}=2,754$	—

169	Ток в стержне ротора I_2, А	(14-123)	—	$\frac{2\cdot 51,8\cdot 53,6\cdot 10^2(0,2+0,8\cdot 0,91)}{220\cdot 38}=616,4$	—
170	Коэффициент дифференциального рассеяния ротора $k_{д2}$	Рис. 14-22	0,0168	0,0091	—
171	Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{д2}$	(14-124)	$\frac{0,9\cdot 12,5\left(\frac{28}{6\cdot 2}\right)^2\cdot 0,0168}{0,3\cdot 1,379}=2,487$	2,030	—
172	Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки $\lambda_{кл}$	(14-125)	$\frac{2,3\cdot 88,4}{28\cdot 120\cdot 0,449^2}\times \lg\frac{4,7\cdot 88,4}{2\cdot 23+2\cdot 6,5}=0,254$	0,373	—
173	Коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов $\lambda_{ск}$	(14-126)	$\frac{12,5\cdot 0,781^2}{9,5\cdot 0,3\cdot 1,379\cdot 1,281}=1,510$	—	—
174	Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора λ_2	(14-127)	$1,796+2,487+0,254+1,510=6,047$	5,157	—
175	Индуктивное сопротивление обмотки ротора x_2, Ом	(14-128)	$7,9\cdot 50\cdot 120\cdot 6,047\times 10^{-8}=2,866\cdot 10^{-4}$	$4,074\cdot 10^{-4}$	—
176	Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, x'_2, Ом	(14-129)	$1,1200\cdot 10^4\cdot 2,866\times 10^{-4}=3,210$	0,346	—
177	Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, x'_{2*}, о. е.	(14-129а)	$\frac{3,210\cdot 8,42}{220}=0,1228$	0,1273	—

Б. Ротор с бутылочными закрытыми пазами и литой клеткой

178	Активное сопротивление верхней части стержня $r_{ст.в}$, Ом	(14-130)	—	—	$\frac{260}{20,5\cdot 61,06\cdot 10^3}=2,0771\cdot 10^{-4}$
179	Активное сопротивление нижней части стержня $r_{ст.н}$, Ом	(14-131)	—	—	$\frac{260}{20,5\cdot 165,86\cdot 10^3}=0,7646\cdot 10^{-4}$

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
180	Коэффициент приведения тока кольца к току стержня $k_{пре}$	(14-116)	—	—	$\frac{2\pi \cdot 2}{70}=0,1794$
181	Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенных к току стержня, $r_{кл}$, Ом	(14-115)	—	—	$\frac{327,8}{20,5 \cdot 2 \cdot 1430 \cdot 0,1794 \cdot 10^{3}}=$ $=0,3116$
182	Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора $k_{пр1}$	(14-118)	—	—	$\frac{4 \cdot 3}{70}\left(\frac{41,0}{1,0}\right)^{2}=0,0288 \cdot 10^{4}$
183	Активное сопротивление верхней части клетки, приведенное к статору, $r'_{в}$, Ом	(14-133)	—	—	$0,0288 \cdot 10^{4} \cdot 2,0771 \cdot 10^{-4}=$ $=0,0598$
184	Активное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору, $r'_{н}$, Ом	(14-134)	—	—	$0,0288 \cdot 10^{4} \cdot 10,7646 \cdot 10^{-4}=$ $=0,0220$
185	Активное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору, $r'_{о}$, Ом	(14-135)	—	—	$0,0288 \cdot 10^{4} \cdot 0,3116 \cdot 10^{-4}=$ $=0,0090$
186	Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки $\lambda_{\sigma н}$	(14-136)	—	—	$\left[\frac{22,8-0,8 \cdot 2,5}{6 \cdot 3,5}\left(1-\frac{\pi \cdot 3,5^{2}}{2 \cdot 165,86}\right)^{2}+0,66-\frac{4,2}{4 \cdot 3,5}\right] \cdot 1+\frac{15-0,1 \cdot 4,2}{2 \cdot 4,2}=$ $=2,968$
187	Коэффициент проводимости рассеяния взаимной индукции $\lambda_{11 м}$	(14-137)	—	—	$\frac{15-0,1 \cdot 4,2}{2 \cdot 4,2}+1,085+1,12 \times$ $\times \frac{0,2 \cdot 10^{3}}{831}=3,090$

188	Суммарный ток верхней и нижней частей клетки I_2, А	(14-123)	—	—	$\frac{2\cdot 41\cdot 288\cdot 10^3\,(0{,}2+0{,}8\cdot 0{,}92)}{380\cdot 70}=831$
189	Коэффициент дифференциального рассеяния $k_{д2}$	Рис. 14-22	—	—	0,0027
190	Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{д2}$	(14-124)	—	—	$\frac{0{,}9\cdot 17{,}18\,(70/6\cdot 2)^2\cdot 0{,}0027}{1{,}1\cdot 1{,}195}=1{,}122$
191	Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки $\lambda_{кл}$	(14-125)	—	—	$\frac{2{,}3\cdot 327{,}8}{70\cdot 260\cdot 0{,}1794^2}\times \lg\frac{4{,}7\cdot 327{,}8}{2\cdot 26+2\cdot 55}=1{,}258$
192	Коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора $\lambda_{2о}$	(14-138)	—	—	$3{,}090+1{,}122+1{,}258=5{,}470$
193	Приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки $\lambda'_{2н}$		—	—	$2{,}968\,\frac{260\cdot 60}{255\cdot 70}\,0{,}911^2=2{,}152$
194	Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору, $x'_н$, Ом	(14-139)	—	—	$0{,}175\cdot\frac{2{,}152}{4{,}297}=0{,}0876$
195	Приведенный коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора $\lambda'_{2о}$		—	—	$5{,}470\cdot\frac{260\cdot 60}{255\cdot 70}\cdot 0{,}911^2=3{,}967$
196	Индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору, $x'_о$, Ом	(14-140)	—	—	$0{,}175\cdot\frac{3{,}967}{4{,}297}=0{,}161$
197	Коэффициент $б_д$		—	—	$\frac{0{,}0598}{0{,}0598+0{,}0220}=0{,}731$
198	Активное результирующее сопротивление r'_2, Ом	(14-141)	—	—	$0{,}0090+0{,}0220\cdot 0{,}731=0{,}0250$
199	Индуктивное результирующее сопротивление x'_2, Ом	(14-142)	—	—	$0{,}161+0{,}0876\cdot 0{,}731^2=0{,}208$

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
200	Активное результирующее сопротивление $r'_2{}^*$, о. е.	(14-120)	—	—	$\frac{0,0250\cdot 252,6}{380}=0,0166$
201	Индуктивное результирующее сопротивление x'_{2*}, о. е.	(14-129а)	—	—	$\frac{0,208\cdot 252,6}{380}=0,1382$
	6. Намагничивающий ток				
	а) Воздушный зазор				
202	Коэффициент воздушного зазора, учитывающий зубчатость статора, $k_{\delta 1}$	(14-157)	$1+\frac{3,5}{9,77-3,5+5\cdot 0,3\frac{9,77}{3,5}}=1,335$	1,138	1,195
203	Коэффициент воздушного зазора, учитывающий зубчатость ротора, $k_{\delta 2}$	(14-158)	$1+\frac{1,0}{12,5-1+5\cdot 0,3\frac{12,5}{1}}=1,033$	1,000	1,000
204	Коэффициент, учитывающий наличие радиальных вентиляционных каналов, $k_к$	(14-160)	1,000	1,000	1,000
205	Коэффициент воздушного зазора k_δ	(14-156)	$1,335\cdot 1,033\cdot 1,000=1,379$	1,138	1,195
206	Магнитное напряжение воздушного зазора на один полюс F_δ, А	(14-155)	$0,08\cdot 0,3\cdot 1,379\cdot 0,8830\cdot 10^4=292,2$	494,5	879,7
	б) Зубцы статора				
207	Ширина зубца статора в расчетных сечениях, мм:*				
	$b'_{з1}$	Из (14-24)	$\frac{\pi(112+2\cdot 15,1)}{36}-7,3=5,11$	7,06	—
	$b''_{з1}$	Из (14-25)	$\frac{\pi(112+0,5\cdot 2+4,9-3,5)}{36}-4,9=5,08$	7,09	—

	$b_{з1}$	—	$\frac{5,11+5,08}{2}=5,095$	7,075	—
	$b_{з1(1/3)}$	(14-164)	—	—	$\frac{\pi(385+2/3 \cdot 43,9)}{60}-10,3=11,39$
208	Магнитная индукция в расчетном сечении зубца статора, Т:				
	$B_{з1}$	Из (14-23)	$\frac{9,77 \cdot 0,8830}{0,97 \cdot 5,095}=1,746$	1,780	—
	$B_{з1(1/3)}$	(14-165)	—	—	$\frac{20,16 \cdot 0,8365}{0,95 \cdot 11,39}=1,559$
209	Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце статора $L_{з1}$, мм	(14-162)	15,1	27,9	43,9
210	Магнитное напряжение зубцов статора $F_{з1}$, А	(14-163)	$0,1 \cdot 13,1 \cdot 15,1=19,8$	40,2	57,5

в) Зубцы ротора

211	Ширина зубца ротора в расчетных сечениях, мм:*				
	$b'_{з2}$	Из (14-55)	$\frac{\pi(111,4-2 \cdot 0,5+2 \cdot 2,4)}{28}-2 \cdot 2,8=7,05$	10,68	—
	$b''_{з2}$	Из (14-63)	$\frac{\pi(111,4-2 \cdot 18+2 \cdot 1,0)}{28}-2 \cdot 1,0=6,67$	8,45	—
	$b_{з2}$	—	$\frac{7,05+6,67}{2}=6,86$	9,52	—
212	Магнитная индукция в расчетных сечениях зубца ротора, Т:				
	$B_{з2мин}$	Из (14-54)	$\frac{12,60 \cdot 0,8830}{0,97 \cdot 7,05}=1,614$	1,476	—
	$B_{з2макс}$	Из (14-54)	$\frac{12,5 \cdot 0,8830}{0,97 \cdot 6,67}=1,702$	1,865	—
	$B_{з2ср}$	Из (14-54)	$\frac{12,5 \cdot 0,8830}{0,97 \cdot 6,86}=1,658$	1,670	—

18—641

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
213	Коэффициент, учитывающий ответвление магнитного потока в паз ротора, $k_{зз макс}$	(14-190)	—	1,515	—
214	Расчетное значение напряженности магнитного поля в зубце ротора $H_{з2}$, А/см	(14-193)	$\frac{11\cdot5+4\cdot10+8\cdot89}{6}=10{,}06$	11,23	—
215	Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце ротора $L_{з2}$, мм	(14-175)	18—0,2·1,0=17,8	45,6	—
216	Магнитное напряжение зубцов ротора $F_{з2}$, А	(14-176)	0,1·10,06·17,8=17,9	51,2	—
217	Средняя ширина зубца в верхней части бутылочного паза $b_{з2з}$, мм	(14-177)	—	—	$\frac{\pi(382{,}8-2\cdot0{,}2-15)}{70}-4{,}2=12{,}29$
218	Магнитная индукция в среднем сечении зубца верхней части паза $B_{з.вз}$, Т	Из (14-54)	—	—	$\frac{17{,}18\cdot0{,}8365}{0{,}97\cdot12{,}29}=1{,}205$
219	Расчетная длина магнитной силовой линии верхней части паза $L_{з\,вз}$, мм	(14-178)	—	—	15
220	Магнитное напряжение зубцов верхней части паза $F_{з\,вз}$, А	(14-179)	—	—	0,1·5,98·15=9,0
221	Ширина зубца нижней части бутылочного паза в расчетном сечении:*				
	$b'_{з.н}$	Из (14-62)	—	—	$\frac{\pi(382{,}8-2\cdot15-2\cdot0{,}2-2\cdot3{,}5)}{70}-2\cdot3{,}5=8{,}50$
	$b''_{з.нз}$	Из (14-63)	—	—	$\frac{\pi(382{,}8-2\cdot44+2\cdot2{,}5)}{70}-2\cdot2{,}5=8{,}45$

	$b_{3.нз}$	—	—	—	$\frac{8,50+8,45}{2}=8,475$
222	Магнитная индукция в нижней части зубца $B_{3.нз}$, Т	Из (14-54)	—	—	$\frac{17,18\cdot 0,8365}{0,97\cdot 8,475}=1,748$
223	Расчетная длина магнитной силовой линии $L_{3.нз}$, мм	(14-181)	—	—	$3,5+22,8+0,8\cdot 2,5=28,3$
224	Магнитное напряжение зубцов нижней части паза $F_{3.нз}$, А	(14-182)	—	—	$0,1\cdot 22,1\cdot 28,3=62,5$
225	Магнитное напряжение зубцов ротора в случае бутылочного паза F_{z2}, А	(14-183)	—	—	$9,0+62,6=71,5$
		г) Спинка статора			
226	Высота спинки статора, h_{c1}, мм	(14-21)	$\frac{172-112}{2}-15,1=16,4$	31,6	58,6
227	Магнитная индукция в спинке статора B_{c1}, Т	Из (14-20)	$\frac{0,00593\cdot 10^{6}}{2\cdot 116,4\cdot 16,4}=1,555$	1,523	1,444
228	Расчетная длина магнитной силовой линии в спинке статора L_{c1}, мм	(14-194)	$\frac{\pi(175-16,4)}{4\cdot 2}=62,2$	128,6	208,7
229	Магнитное напряжение спинки статора F_{c1}, А	(14-195)	$0,1\cdot 6,42\cdot 62,2=39,9$	73,4	156,1
		д) Спинка ротора			
230	Расчетная длина магнитной силовой линии спинки ротора L_{c2}, мм	(14-197)	$\frac{\pi(40+23,56+\frac{4}{3}\cdot 0)}{4\cdot 2}=25,0$	51,4	97,8
231	Магнитное напряжение спинки ротора F_{c2}, А	(14-198)	$0,1\cdot 2,13\cdot 25,0=5,3$	10,4	35,4
		е) Параметры магнитной цепи			
232	Намагничивающая сила магнитной цепи на один полюс ΣF, А	(14-199)	$292,2+19,8+17,9+39,9+$ $+5,3=375,1$	669,7	1200,2
233	Коэффициент насыщения магнитной цепи $k_{н}$	(14-200)	$\frac{375,1}{292,2}=1,284$	1,354	1,364

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
234	Намагничивающий ток $I_м$, А	(14-201)	$\frac{2,22\cdot 375,1\cdot 2}{3\cdot 161,1}=3,46$	19,13	43,32
235	Намагничивающий ток в процентах от номинального $I_{м\%}$, %	(14-202)	$\frac{3,46}{8,42}=41,1$	23,6	17,1
236	Главное индуктивное сопротивление $x_м$, Ом	(14-203)	$\frac{0,967\cdot 220}{3,46}=61,486$	11,260	8,632
237	Главное индуктивное сопротивление $x_{м*}$, о. е.	(14-204)	$\frac{61,486\cdot 8,42}{220}=2,352$	4,152	5,738
238	Коэффициент рассеяния статора τ_1	(14-205)	$\frac{1,942}{61,486}=0,0316$	0,0192	0,0202
239	Коэффициент сопротивления статора ρ_1	(14-206)	$\frac{1,6255}{1,942+61,486}=0,0256$	0,0072	0,0035
	7. К определению рабочих и пусковых характеристик на основе схемы замещения				
240	Параметры схемы замещения, Ом: r'_1 x'_1 r''_2 x''_2	(14-212а)	1,6255 $1,942(1+0,0316)=2,003$ $1,4103(1+0,0316)^2=1,5007$ $3,210(1+0,0316)^2=3,416$	0,0834 0,220 0,0443 0,358	0,0310 0,179 0,0260 0,216
	8. Холостой ход				
241	Реактивная составляющая тока статора при синхронном вращении $I_{ср}$, А	(14-213)	$\frac{220}{61,486(1+0,0316)}=3,47$	19,11	43,15
242	Электрические потери в обмотке статора при синхронном вращении $P_{э\,м1}$, Вт	(14-214)	$3\cdot 3,47^2\cdot 1,6255=58,7$	91,4	173,2

243	Расчетная масса стали зубцов статора, кг: $G_{з1}$	(14-215)	$7,8\cdot 36\cdot 5,095\cdot 15,1\cdot 116,4\cdot 10^{-6}=2,51$	14,37	—
	$G_{з1}$	(14-216)	—	—	$7,8\cdot 60\cdot 12,157\cdot 43,9\cdot 242,2\times 10^{-6}=60,49$
244	Магнитные потери в зубцах статора, Вт: $P_{з1}$	(14-218)	$4,4\cdot 1,745^2\cdot 2,51=33,7$	200,3	—
	$P_{з1}$	(14-219)	—	—	$3,0\cdot 1,462^2\cdot 60,49=387,9$
245	Расчетная масса стали спинки статора G_{c1}, кг	(14-221)	$7,8\pi(175-15,1)\cdot 15,4\cdot 116,4\times 10^{-6}=7,48$	49,74	189,93
246	Магнитные потери в спинке статора, Вт: P_{c1}	(14-223)	$4,4\cdot 1,555^2\cdot 7,48=79,6$	507,6	—
	P_{c1}	(14-224)	—	—	$3,0\cdot 1,444^2\cdot 189,93=1188,1$
247	Суммарные магнитные потери в сердечнике статора при холостом ходе, включая добавочные потери в стали, ΣP_c, Вт	(14-226)	$33,7\cdot\left[1+2\sqrt{\frac{9,77}{10}}(1,379-1)^2\right]+79,6=128,8$	733,2	1670,4
248	Механические потери, Вт. $\Sigma P_{мх}$	(14-229)	$1,0\cdot\left(\frac{1500}{1000}\right)^2\cdot\left(\frac{175}{100}\right)^4=21,1$	373,7	—
	$\Sigma P_{мх}$	(14-228)	—	—	$7\left(\frac{1500}{1000}\right)^2\cdot\left(\frac{385}{100}\right)^4=898,8$
249	Активная составляющая тока холостого хода I_{0a}, А	(14-230)	$\frac{58,7+128,8+21,1}{3\cdot 220}=0,32$	1,82	2,41
250	Ток холостого хода I_0, А	(14-231)	$\sqrt{0,32^2-3,47^2}=3,48$	19,19	43,21
251	Коэффициент мощности при холостом ходе $\cos\varphi_0$	(14-232)	$\frac{0,32}{3,48}=0,0920$	0,0948	0,0558

9. Номинальный режим и рабочие характеристики

252	Приведенное активное сопротивление короткого замыкания $r_к$, Ом	(14-233)	$1,6255+1,5007=3,1262$	0,1277	0,0570
	Приведенное индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_к$, Ом	(14-233)	$2,003+3,416=5,419$	0,578	0,395

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
	Приведенное полное сопротивление короткого замыкания $z_к$, Ом	(14-233)	$\sqrt{3,1262^2+5,419^2}=6,256$	0,592	0,399
	Приведенное полное сопротивление при $s=\infty$ z_{∞}, Ом	(14-233)	$\sqrt{1,6255^2+5,419^2}=5,658$	0,584	0,396
253	Механическая мощность двигателя P'_2, Вт	(14-234)	$4000+21,1+23,8=4044,9$	45 618	252 221
254	Добавочные потери при номинальной нагрузке $P_д$, Вт	—	$0,005\frac{4000}{0,84}=23,8$	244,5	1322,7
255	Сопротивление схемы замещения $R_н$, Ом	(14-237)	$\frac{3\cdot 220^2}{2\cdot 4044,9}-3,1262+\sqrt{\left(\frac{3\cdot 220^2}{2\cdot 4044,9}-3,1262\right)^2-6,256^2}=28,262$	2,802	1,496
256	Полное сопротивление схемы замещения $Z_н$, Ом	(14-238)	$\sqrt{(28,262+3,1262)^2+5,419^2}=31,853$	2,986	1,603
257	Скольжение $s_н$	(14-240)	$\frac{1}{1+\frac{28,262}{1,5007}}=0,0504$	0,0155	0,0170
258	Активная составляющая тока статора при синхронном вращении $I_{с.а}$, А	(14-241)	$\frac{58,7+128,8}{3\cdot 220}=0,28$	1,25	1,62
259	Расчетный ток ротора I''_2, А	(14-242)	$\frac{220}{31,853}=6,91$	73,68	237,1
260	Активная составляющая тока статора $I_{а1}$, А	(14-243)	$0,28+6,91\left(\frac{28,262+3,1262}{31,853}+\frac{5,419}{31,853}\cdot 2\cdot 0,0256\right)=7,15$	73,73	231,8

261 Реактивная составляющая тока статора I_{p1}, А	(14-244)	$3,47+6,91\left(\frac{5,419}{31,853}-\right.$ $\left.-\frac{28,262+3,1262}{31,853}\cdot 2\cdot 0,0256\right)=4,30$	32,34	100,0
262 Фазный ток статора I_1, А	(14-245)	$\sqrt{7,15^2+4,30^2}=8,34$	80,51	252,4
263 Коэффициент мощности $\cos\varphi$	(14-246)	$\frac{7,15}{8,34}=0,857$	0,916	0,92
264 Линейная нагрузка статора A_1, А/см	(14-247)	$10\cdot 8,34\frac{28}{1\cdot 9,77}=239,0$	350,4	563,4
265 Линейная нагрузка ротора A_2, А/см	(14-248)	$239,0\frac{6,91(1+0,0316)}{8,34}\times$ $\times\frac{0,960}{1\cdot 0,9965}=196,8$	312,0	492,5
266 Ток в стержне короткозамкнутого ротора $I_{ст}$, А	(14-249)	$6,91\frac{2\cdot 3\cdot 168\cdot 0,960}{28\cdot 0,9965}\times$ $\times(1-0,0316)=247,22$	616,70	[redacted]
267 Ток в короткозамыкающем кольце $I_{кл}$, А	(14-250)	$\frac{247,22}{0,449}=550,60$	1870,48	4738,0
268 Ток в верхней части стержня в случае бутылочного паза $I_{ст.в}$, А	(14-251)	—	—	850,0(1—0,731)=228,6
269 Ток в нижней части стержня в случае бутылочного паза $I_{ст\ в}$, А	(14-252)	—	—	850,0·0,731=621,4
270 Плотность тока в обмотке статора J_1, А/мм²	(14-35)	$\frac{8,34}{1\cdot 1,227\cdot 1}=6,80$	5,31	4,94
271 Плотность тока в стержне короткозамкнутого ротора $J_{ст}$, А/мм²	(14-254)	$\frac{247,22}{58,55}=4,22$	2,28	3,74
272 Плотность тока в короткозамыкающем кольце $J_{кл}$, А/мм²	(14-254)	$\frac{550,60}{149,5}=3,68$	2,02	3,13
273 Электрические потери в обмотке статора при нагрузке $P_{м1}$, Вт	(14-255)	$3\cdot 8,34^2\cdot 1,6255=339,2$	1621,8	5924,6

Продолжение табл. 15-5

№ п/п	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
274	Электрические потери в обмотке ротора при нагрузке $P_{м2}$, Вт	(14-256)	$3\cdot 6,91^2\cdot 1,5007=215,0$	722,4	4384,9
275	Суммарные потери в двигателе ΣP, Вт	(14-257)	$339,2+215,0+128,8+21,1+$ $+23,8=727,9$	3695,7	14201,4
276	Подводимая мощность двигателя P_1, Вт	(14-258)	$4000+727,9=4727,9$	48695,7	264201,4
277	Коэффициент полезного действия двигателя η, %	(14-259)	$\left(1-\frac{727,9}{4727,9}\right)\cdot 100\%=84,60$	92,41	94,62
	10. Начальный пусковой момент и начальный пусковой ток				
278	Приведенная высота проводника ξ	(14-110)	$0,066\cdot 17,5\sqrt{1}=1,155$	2,880	2,800
279	Коэффициент φ Коэффициент ψ	Рис. 14-21 Рис. 14-21	0,15 0,95	1,90 0,52	1,80 0,53
280	Расчетная глубина проникновения тока в стержень $h_р$, мм	(14-111)	$\frac{17,5}{1+0,15}=15,22$	15,52	15,50
281	Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока $b_р$, мм	(14-112)	$2\cdot 2,4-\frac{2(2,4-1,0)}{14,1}(15,22-$ $-2,4)=2,255$	6,968	—
282	Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока $q_р$, мм²	(14-113)	$\frac{\pi\cdot 2,4^2}{2}+\left(2,4+\frac{2,255}{2}\right)\times$ $\times(15,22-2,4)=54,26$	112,90	—
283	Коэффициент вытеснения тока $k_{в.т}$	(14-114)	$\frac{58,56}{54,26}=1,079$	2,389	—
284	Активное сопротивление стержня клетки $r_{ст}$, Ом	(14-108)	$\frac{120}{21,5\cdot 58,56\cdot 10^3}\cdot 1,079=$ $=1,0282\cdot 10^{-4}$	$0,8630\cdot 10^{-4}$	—
285	Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, r'_2, Ом	(14-119)	$1,1200\cdot 10^4(1,0282+0,3062)\times$ $\times 10^{-4}=1,4945$	0,0852	—

286	Коэффициент проводимости рассеяния пазов ротора с учетом вытеснения тока $\lambda_{п2}$	(14-121)	$\frac{14,1+0,8\cdot 1,0}{6\cdot 2,4}\left(1-\frac{\pi 2,4^2}{2\cdot 58,56}\right)^2+0,66-\frac{1}{4\cdot 2,4}0,05+\frac{0,5}{1,0}=1,731$	—	—
		(14-122)	—	$\frac{38,9+0,8\cdot 2,0}{6\cdot 4,1}\left(1-\frac{\pi\cdot 4,1^2}{2\cdot 269,98}\right)^2+0,66-\frac{1,5}{4\cdot 4,1}0,52+0,3+1,12\cdot\frac{0,3\cdot 10^3}{616,4}=1,838$	—
287	Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора λ_2	(14-127)	$1,731-2,487+0,254+1,510=5,982$	4,241	—
288	Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом вытеснения тока x_2, Ом	(14-128)	$7,9\cdot 50\cdot 120\cdot 5,982\cdot 10^{-9}=2,8354\cdot 10^{-4}$	$3,350\cdot 10^{-4}$	—
289	Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом вытеснения, приведенное к обмотке статора, x'_2, Ом	(14-129)	$1,1200\cdot 10^4\cdot 2,8354\cdot 10^{-4}=3,176$	3,284	—
290	Площадь поперечного сечения бутылочного паза при пуске $q_{ст}$, мм²	(14-66)**	—	—	$4,2(15,50-0,11\cdot 4,2)=63,16$
291	Активное сопротивление стержня бутылочного паза при пуске $r_{ст\,в}$, Ом	(14-130)	—	—	$\frac{260}{20,5\cdot 63,16\cdot 10^3}=2,008\cdot 10^{-4}$
292	Активное сопротивление стержней клетки ротора при пуске, приведенное к статору, $r'_в$, Ом	(14-133)	—	—	$0,0288\cdot 10^4\cdot 2,008\cdot 10^{-4}=0,0578$
293	Глубина проникновения для расчета проводимости рассеяния $h_{хн}$	(14-136а)	—	—	$43,8\cdot 0,53-15=8,21$
294	Коэффициент демпфирования ψ''	(14-136а)	—	—	$\frac{8,21}{44-0,2-15}=0,285$

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
295	Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки с учетом вытеснения тока $\lambda_{2н}$	(14-136)	—	—	$\frac{22,8+0,8\cdot2,5}{6\cdot3,5}\left(1-\frac{\pi\cdot3,5^2}{2\cdot165,86}\right)^2+0,66-\frac{4,2}{4\cdot3,5}0,285+\frac{15-0,1\cdot4,2}{2\cdot4,2}=2,101$
296	Приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки с учетом вытеснения тока $\lambda'_{2н}$	(14-139)	—	—	$2,101\cdot\frac{260\cdot60}{255\cdot70}\cdot0,911^2=1,524$
297	Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору, $x'_{н}$, Ом	(14-139)	—	—	$0,175\frac{1,524}{4,297}=0,062$
298	Ширина нижней части стержня $b_{хн}$ на глубине $h_{хн}$	(14-112)	—	—	$2\cdot3,5-\frac{2(3,5-2,5)}{22,8}\times(8,21-3,5)=6,587$
299	Площадь поперечного сечения нижней части стержня $q_{хн}$ при глубине $h_{хн}$	(14-113)	—	—	$\frac{\pi}{2}\cdot3,5^2+\left(3,5+\frac{6,587}{2}\right)\times(8,21-3,5)=51,24$
300	Коэффициент θ_x	(14-142)	—	—	$\frac{51,24}{51,24+61,06}=0,456$
301	Активное результирующее сопротивление, r'_2, Ом	(14-141)	—	—	$0,0090+0,0578=0,0668$
302	Индуктивное результирующее сопротивление x'_2, Ом	(14-142)	—	—	$0,161+0,062\cdot0,456^2=0,174$

[illegible]	Параметры схемы замещения, Ом: r''_2; x''_2	(14-212а)	$1,4945(1+0,0316)^2=1,5900$; $3,176(1+0,0316)^2=3,380$	0,0892; 0,295	0,0695; 0,181
304	Приведенное активное сопротивление короткого замыкания $r_к$, Ом	(14-233)	$1,6255+1,5900=3,2155$	0,1726	0,1005
	Приведенное индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_к$, Ом	(14-233)	$2,003+3,380=5,383$	0,516	0,360
	Приведенное полное сопротивление короткого замыкания $z_к$, Ом	(14-233)	$\sqrt{3,2155^2+5,383^2}=6,271$	0,542	0,374
305	Составляющая коэффициента пазовой проводимости статора, зависящая от насыщения, $\lambda_{п1пер}$	(14-261)	$\left(\frac{3\cdot 0,7}{4,9+2\cdot 3,5}+\frac{0,5}{3,5}\right)\cdot 1=0,319$	0,395	
		(14-262)	—	—	$\left(\frac{3\cdot 3,0}{10,3+2\cdot 6,2}+\frac{1,0}{6,2}\right)\times$ $\times 0,85=0,474$
306	Составляющая коэффициента проводимости статора, зависящая от насыщения, $\lambda_{1пер}$	(14-264)	$0,319+2,16=2,479$	1,465	1,083
307	Составляющая коэффициента пазовой проводимости ротора с овальными полузакрытыми пазами, зависящая от насыщения, $\lambda_{п2пер}$	(14-265)	$\frac{0,5}{1,0}=0,5$	—	—
	Составляющая коэффициента пазовой проводимости ротора с овальными закрытыми пазами, зависящая от насыщения, $\lambda_{п2пер}$	(14-266)	—	$1,12\frac{0,3\cdot 10^3}{615,4}=0,545$	—
	Составляющая коэффициента пазовой проводимости ротора с бутылочными пазами, зависящая от насыщения, $\lambda_{в.в\,пер}$	(14-267)	—	—	$1,12\frac{0,2\cdot 10^3}{831}=0,269$

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
308	Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения, $\lambda_{2\,нр}$	(14-269)	$0,5+2,487=2,987$	2,575	1,391
309	Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения, $x_{пер}$, Ом	(14-270)	$2,003\frac{2,479}{4,355}+3,380\frac{2,987}{5,982}=$ $=2,828$	0,273	—
		(14-271)	—	—	$0,179\frac{1,083}{4,297}+$ $+0,1675\frac{1,391}{5,470}=$ $=0,088$
310	Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения, $x_{пост}$, Ом	(14-273)	$2,003\frac{4,355-2,479}{4,355}+$ $+3,380\frac{5,982-2,987}{5,982}=2,555$	0,243	—
		(14-274)	—	—	$0,179\frac{4,297-1,083}{4,297}+$ $+0,1675\times$ $\times\frac{5,470-1,391}{5,470}+$ $+0,0645\cdot0,456^2=$ $=0,272$
311	Расчетный ток ротора при пуске $I''_{пк}$, А:				
	ротор с овальными полузакрытыми пазами	(14-275)	$\frac{220}{\sqrt{3,2155^2+(2,555+0,0825\cdot2,828)^2}}-$ $-\frac{1,24\cdot10^4\cdot0,3\cdot1\cdot2,828\times}{28\,[3,2155^2+(2,555+} \rightarrow$ $\rightarrow\frac{\times(2,555+0,0825\cdot2,828)}{+0,0825\cdot2,828)^2]}=45,92$	—	—

	ротор с овальными закрытыми пазами	(14-275)***	—	$\frac{220}{\sqrt{0,1726^2+(0,243+0,25\cdot 0,273)^2}}-\frac{1,24\cdot 10^3\cdot 0,7\cdot 2\cdot 0,273\times}{14\,[0,1726^2+(0,243+}\to$ $\frac{\times(0,243+0,25\cdot 0,273)}{+0,25\cdot 0,273)^2]}=$ $=535,70$	
	ротор с бутылочными закрытыми пазами	(14-275)***	—	—	1131,7
312	Расчетные параметры схемы замещения при пуске с учетом вытеснения тока и насыщения, Ом:				
	$z_к$	(14-276)	$\frac{4,791}{}$	0,411	0,336
	$x_к$	(14-277)	$\sqrt{4,791^2-3,2155^2}=3,551$	0,373	0,321
313	Активная составляющая тока статора при пуске $I_{п.а1}$, А	(14-278)	$0,28+45,92\left(\frac{3,2155}{4,791}+\frac{3,551}{4,791}\times\right.$ $\left.\times 2\cdot 0,0256\right)=32,26$	233,37	347,6
314	Реактивная составляющая тока статора при пуске $I_{п.р1}$, А	(14-279)	$3,47+45,92\left(\frac{3,551}{4,791}-\frac{3,2155}{4,791}\times\right.$ $\left.\times 2\cdot 0,0256\right)=35,35$	502,26	1123,1
315	Фазный ток статора при пуске $I_{п1}$, А	(14-280)	$\sqrt{32,26^2+35,35^2}=47,85$	553,81	1176,0
316	Кратность пускового тока $I_{п1}/I_1$	—	$\frac{47,85}{8,36}=5,72$	6,88	4,52
317	Кратность пускового момента $M_п/M_к$	(14-281)	$\frac{3\cdot 45,92^2\cdot 1,5900\,(1-0,0504)}{4000}=2,39$	1,68	1,03

11. Максимальный момент

318	Индуктивное сопротивление двигателя, зависящее от насыщения $x_{пср}$, Ом	(14-270)	$2,003\,\frac{2,479}{4,355}+3,416\,\frac{2,987}{6,047}=$ $=2,828$	0,273	—

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
		(14-271)	—	—	$0{,}179\frac{1{,}083}{4{,}297}+0{,}1675\frac{1{,}391}{5{,}470}=0{,}088$
319	Индуктивное сопротивление двигателя, не зависящее от насыщения, $x_{пкст}$, Ом	(14-273)	$2{,}003\frac{4{,}355-2{,}479}{4{,}355}+3{,}416\times\frac{6{,}047-2{,}987}{6{,}047}=2{,}591$	0,305	—
		(14-274)	—	—	$0{,}179\frac{4{,}297-1{,}083}{4{,}297}+0{,}1675\times\frac{5{,}470-1{,}391}{5{,}470}+0{,}0912\cdot0{,}731^2=0{,}307$
320	Расчетный ток ротора с учетом насыщения $I''_{м2}$, А	(14-282)	$\frac{220}{\sqrt{2[1{,}6255^2+(2{,}591+0{,}0825\cdot2{,}828)^2+1{,}6255\times(2{,}591+0{,}0825\cdot2{,}828)]-\frac{1{,}24\cdot10^2\cdot0{,}3\cdot1[1{,}6255+2\times(2{,}591+0{,}0825\cdot2{,}828)]\times2{,}828}{2\cdot28[1{,}6255^2+(2{,}591+0{,}0825\cdot2{,}828)^2+1{,}6255\times(2{,}591+0{,}0825\cdot2{,}828)^2]}}}=30{,}91$	—	—

		(14-282)***	—	$\dfrac{220}{\sqrt{2\,[0{,}0834^2+(0{,}305+0{,}25\times0{,}273)^2+0{,}0834\times(0{,}305+0{,}25\cdot0{,}273)]}}-\dfrac{1{,}24\cdot10^3\cdot0{,}7\cdot2\cdot[0{,}0834+2\times(0{,}305+0{,}25\cdot0{,}273)]\times0{,}273}{2\cdot14\,[0{,}0834^2+(0{,}305+0{,}25\cdot0{,}273)^2+0{,}0834\times(0{,}305+0{,}25\cdot0{,}273)]}=290$	698,2
321	Сопротивления схемы замещения при максимальном моменте, Ом:				
	$z_м$	(14-283)	7,117	0,760	0,544
	z_{∞}	(14-284), (14-285)	$\dfrac{\sqrt{1{,}6255^2+2\cdot7{,}117^2}-1{,}6255^2}{2}=4{,}2862$	0,4973	0,3725
	$x_к$	(14-284)	$\sqrt{4{,}2862^2-1{,}6255^2}=3{,}965$	0,490	0,371
	$R_м$	(14-285)	$4{,}2862+1{,}6255=5{,}9117$	0,5807	0,4035
322	Активная составляющая тока статора $I_{м.а1}$, А	(14-286)	$0{,}28+30{,}91\left(\dfrac{5{,}9117}{7{,}1174}+\dfrac{3{,}965}{7{,}1174}\times2\cdot0{,}0256\right)=27{,}69$	224,98	519,61
323	Реактивная составляющая тока статора $I_{м.р1}$, А	(14-287)	$3{,}47+30{,}91\left(\dfrac{3{,}965}{7{,}1174}-\dfrac{5{,}9117}{7{,}1174}\times2\cdot0{,}0256\right)=19{,}37$	202,59	514,20
324	Ток фазы статора $I_{м1}$, А	(14-288)	$\sqrt{27{,}69^2+19{,}37^2}=33{,}80$	302,72	732,10
325	Кратность максимального момента $M_м/M_н$	(14-289)	$\dfrac{3\cdot220^2\,(1-0{,}0504)}{2\cdot5{,}9117\cdot4000}=2{,}92$	2,74	2,11

Продолжение табл. 15-5

№ п/п	Параметр	Формула, эскиз, табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
326	Скольжение при максимальном моменте $s_м$	(14-290)	$\frac{1,5007}{4,2862}=0,350$	0,089	0,070
	12. Тепловой расчет обмотки статора				
327	Коэффициент приведения потерь в обмотке статора к предельной допускаемой температуре $k_{\theta 1}$	§ 14-14,а	1,15	1,07	1,07
328	Коэффициент, учитывающий долю потерь в активной части статора, передаваемых воздуху внутри двигателя, k	Табл. 14-35	0,2	0,2	0,8
329	Превышение температуры сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\theta_{п1}$, °C	(14-307)	$\frac{0,2\left(1,15\cdot 339,2\frac{2\cdot 120}{558}+128,8\right)}{\pi\cdot 112\cdot 120\cdot 9\cdot 10^{-8}}=$ $=15,10$	17,00	74,12
330	Коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора α_1, Вт/(мм²·°C)	Рис. 14-31	$9,3\cdot 10^{-5}$	$11,6\cdot 10^{-5}$	$13,7\cdot 10^{-5}$
331	Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза статора $П_1$, мм	§ 14-14,б	$2(15,1+7,3+4,9)=42,4$ —	77,2 —	— $2(43,9+10,3)=108,4$
332	Односторонняя толщина изоляции в паза у статора $b_{и1}$, мм	Табл. 14-14	0,25 —	0,40 —	— $\frac{10,3-2\cdot 3,75}{2}=1,4$
333	Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора $\Delta\theta_{и1}$, °C	(14-308)	$\frac{1,15\cdot 339,2\cdot\frac{2\cdot 120}{558}}{36\cdot 42,4\cdot 120}\times$ $\times\left(\frac{0,25}{16\cdot 10^{-5}}+\frac{7,3+4,9}{16\cdot 13\cdot 10^{-4}}\right)=$ $=1,97$	3,44	11,81

334	Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta_{п.л}$, °С	(14-309)	$\frac{0,2\cdot 1,15\cdot 339,2\cdot\frac{2\cdot 159}{558}}{2\cdot\pi\cdot 112\cdot 49\cdot 9,3\cdot 10^{-5}}=13,86$	13,70	56,80
335	Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения одной катушки в лобовой части $П_л$, мм	§ 14-14,6	$2\cdot 15,1+7,3+4,9=42,4$ —	77,2 —	— $2(43,9+10,3)=108,4$
336	Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора $\Delta\vartheta_{и.л}$, °С	(14-310)	$\frac{1,15\cdot 339,2\cdot\frac{2\cdot 159}{558}}{2\cdot 36\cdot 42,4\cdot 159}\times$ $\times\frac{15\cdot 1}{12\cdot 13\cdot 10^{-4}}=0,44$	0,78	2,11
337	Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta'_1$, °С	(14-311)	$(15,10+1,97)\frac{2\cdot 120}{558}+(13,86+$ $+0,44)\frac{2\cdot 159}{558}=15,49$	17,05	68,47
338	Сумма потерь при предельной допускаемой температуре, передаваемых воздуху внутри двигателя, $\Sigma P'$, Вт	§ 14-14,6	$0,2\cdot 1,15\cdot 339,2\cdot\frac{2\cdot 120}{558}+1,15\times$ $\times 339,2\cdot\frac{2\cdot 159}{558}+1,055\cdot 215,0+$ $+0,2\cdot 128,8+23,8+0,1\cdot 21,1=$ $=534,1$	2342,5	13967,4
339	Условная поверхность охлаждения двигателя $S_{дв}$, мм²	§ 14-14,6	$(\pi\cdot 175+8\cdot 19)(120+2\cdot 49)=$ $=4,60\cdot 10^5$ —	$15,9\cdot 10^5$ —	— $\pi\cdot 590(255+2\cdot 174)=$ $=1,12\cdot 10^6$
340	Коэффициент подогрева воздуха $\alpha_в$, Вт/(мм²·°С)	Рис. 14-33	$2,17\cdot 10^{-5}$	$2,5\cdot 10^{-5}$	$113\cdot 10^{-5}$
341	Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды $\Delta\vartheta_в$, °С	(14-312)	$\frac{534,1}{4,60\cdot 10^5\cdot 2,17\cdot 10^{-5}}=53,50$	58,90	11,04

Продолжение табл. 15-5

№ п/п	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
342	Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды $\Delta\theta_1$, °С	(14-313)	$15,49+53,50=69$	76	79,5
			13. Расчет вентиляции		
[redacted]	Необходимое количество воздуха Q_1, м³/с	(14-323)	$\frac{727,9\cdot 1,8\sqrt{\frac{1424}{1000}\cdot\frac{175}{100}}}{11\,000\cdot 53,5}=0,035$	0,236	—
		(14-320)	—	—	$\frac{13967,4}{1100\cdot 2\cdot 11,04}=0,574$
344	Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, Q_{1}, м³/с	(14-323а)	$0,6\cdot\frac{1424}{1000}\cdot\left(\frac{175}{100}\right)^2\cdot 10^{-2}=0,0455$	0,41	—
345	Расход воздуха, обеспечиваемый нагнетательными элементами $Q_в$, м³/с	(14-321)	—	—	$3\cdot(0+100)\frac{1474}{1000}\left(\frac{382,8}{100}\right)^2\times$ $\times 10^{-4}=0,648$
346	Напор воздуха, развиваемый при аксиальной вентиляции, H, Па	(14-323б)	$12,3\left(\frac{1424}{1000}\right)^2\left(\frac{175}{100}\right)^2=76$	345	—
347	Напор воздуха, развиваемый при радиальной вентиляции, H, Па	(14-322)	—	—	$7,85\left(\frac{1474}{1000}\right)^2\left(\frac{382,8}{100}\right)^2=251$

14. Динамические параметры

а) Определение числа допустимых пусков и реверсов

348	Суммарные потери двигателя за один пуск при холостом ходе $\Sigma P_{ф}$, Вт·с	§ 14-16,а	$\frac{0,0134}{180} \cdot \frac{1500^2}{1000} \times \left[1+\frac{339,2 \cdot 5.66^2 (1-0,0504)}{4000 \cdot 2,28}\right] \times 10^3 = 357$	11 750	78 200
349	Приближенное значение числа пусков в 1 ч при холостом ходе $h_{о.п}$	(14-324)	$3600 \frac{727,9}{357} = 7330$	1140	652
350	Допустимое число реверсов в 1 ч при холостом ходе $h_{о.р}$	(14-325)	$0,3 \cdot 7330 = 2200$	342	195

б) Динамический момент инерции ротора

351	Приближенное значение динамического момента инерции ротора J, км·м²	(14-326)	$0,73 \cdot 111,4^4 \cdot 120 \cdot 10^{-12} = 0,0134$	0,47	4,05

15. Масса двигателей

352	Масса изолированных проводов обмотки статора $G_{м1}$, кг	(14-327)	$\left[7,55+1,35\left(\frac{1,33}{1,25}\right)^2\right]^2 36 \frac{28}{2} \times 558 \cdot 1 \cdot 1,227 \cdot 10^{-5} = 3,13$	21,68	—
		(14-328)	—	—	$\left(7,55+1,35 \frac{1,95 \times 3,90}{6,387}\right) \times 60 \cdot \frac{18}{2} \cdot 1440 \cdot 2 \cdot 6,387 \times 10^{-6} = 90,9$
353	Масса алюминия короткозамкнутого ротора с литой клеткой $G_{ал2}$, кг	(14-329)	$2,7 [28 \cdot 58,56 \cdot 120 + 2\pi \cdot 88,4 \times 149,5 + 1,1 \cdot 9 \cdot (31-6,5) \cdot 17 \cdot 3] \times 10^{-6} = 0,79$	8,61	20,12

19*

Продолжение табл. 15-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Двигатель № 1	Двигатель № 2	Двигатель № 3
354	Масса стали сердечников статора и ротора ΣG_c, кг	(14-331)	$7{,}8\cdot116{,}4\,[0{,}765\,(175^2-40^2)-36\cdot87{,}8-28\cdot58{,}56-0]\,10^{-6}=15{,}8$	106,8	394
355	Масса изоляции статора $G_{и1}$, кг	(14-332)	$1{,}35(120+20)\cdot(2\cdot15{,}1+3\cdot6{,}1)\cdot0{,}25\cdot36\cdot10^{-6}=0{,}083$	0,501	—
		(14-333)	—	—	$1{,}35\cdot60\,[(255+20)\cdot(2{,}2\times43{,}9+4{,}5\cdot10{,}3)+465(1{,}0\cdot43{,}9+1{,}0\times10{,}3)]\cdot10^{-6}=5{,}23$
356	Масса конструкционных материалов $G_к$, кг	(14-335б)	$(0{,}7\cdot175^2\cdot120+3{,}5\cdot173^3)\cdot10^{-6}=21{,}33$	180,0	—
		(14-339в)	—	—	$1{,}1\cdot590^2\cdot255\cdot10^{-6}+13\times590^{1{,}5}\cdot10^{-3}=447{,}6$
357	Масса двигателя $G_{дв}$, кг	(14-341)	$3{,}13+0{,}79+15{,}8+0{,}083+21{,}33=41{,}1$	317,6	957,9

* $b'_{з1}$, $b'_{з2}$, $b'_{з.на}$ и $b''_{з1}$, $b''_{з2}$, $b''_{з.н2}$ — ширина зубца в верхнем и нижнем расчетных сечениях.

** Расчет проводим по (14-113а), в виду малой разности $h_p - h$ по (14-66).

*** Вместо коэффициента 0,0825 принят коэффициент 0,25.

Таблица 15-6

Параметр	Формула	Параметры при k				
		0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
P_2, Вт	—	1000	2000	3000	4000	5000
P'_2, Вт	(14-234)	1033,6	2033,3	3038,5	4044,9	5050,8
$R_н$, Ом	(14-237)	133,920	64,544	40,567	28,262	20,595
$Z_н$, Ом	(14-238)	137,153	67,880	44,030	31,853	24,33
$s_н$, о. е.	(14-240)	0,0074	0,0227	0,0356	0,0504	0,0679
I''_2, А	(14-242)	1,60	3,24	5,00	6,91	9,04
I_{a1}, А	(14-243)	1,88	3,52	5,27	7,15	9,20
$I_{р1}$, А	(14-244)	3,45	3,56	3,83	4,30	5,03
I_1, А	(14-245)	3,93	5,00	6,52	8,34	10,48
$\cos\varphi$,	(14-246)	0,478	0,704	0,808	0,857	0,878
$P_{м1}$, Вт	(14-255)	75,3	121,9	207,3	339,2	535,6
$P_{м2}$, Вт	(14-256)	11,5	47,3	112,6	215,0	367,9
ΣP, Вт	(14-257)	243,0	331,3	487,2	727,9	1083,1
P_1, Вт	(14-258)	1243,0	2331,3	3487,2	4727,9	6083,1
η, %	(14-259)	80,45	85,79	86,03	84,60	82,19

Таблица 15-7

Параметр	Формула	Параметры при k				
		0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
P_2, Вт	—	11 250	22 500	33 750	45 000	56 250
P'_2, Вт	(14-234)	11689,9	22996,0	34303,2	45 618	56929,4
$R_н$, Ом	(14-237)	12,137	6,000	3,887	2,802	2,130
$Z_н$, Ом	(14-238)	12,280	6,156	4,056	2,986	2,330
$s_н$, о. е.	(14-240)	0,0037	0,0073	0,0113	0,0155	0,0205
I''_2, А	(14-242)	17,92	35,74	54,24	73,68	94,42
I_{a1}, А	(14-243)	19,15	36,87	55,04	73,73	93,06
$I_{р1}$, А	(14-244)	19,57	21,95	26,07	33,34	41,23
I_1, А	(14-245)	27,38	42,92	60,90	80,51	101,10
$\cos\varphi$	(14-246)	0,699	0,859	0,904	0,916	0,914
$P_{м1}$, Вт	(14-255)	187,6	460,9	927,9	1621,8	2592,9
$P_{м2}$, Вт	(14-256)	42,6	169,8	391,0	722,4	1184,8
ΣP, Вт	(14-257)	1403,3	1859,9	2605,3	3695,7	5190,3
P_1, Вт	(14-258)	12653,3	24359,9	36355,3	48695,7	61440,3
η, %	(14-259)	88,91	92,36	92,83	92,41	91,55

Таблица 15-8

Параметр	Формула	Параметры при k				
		0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
P_2, Вт	—	62 500	125 000	187 500	250 000	312 500
P'_2, Вт	(14-234)	63 746	126556,6	189385,6	252 221	315 061
$R_н$, Ом	(14-237)	6,659	3,258	2,097	1,496	1,118
$Z_н$, Ом	(14-238)	6,727	3,339	2,190	1,603	1,240
$s_н$, о. е.	(14-240)	0,0039	0,0079	0,0122	0,0170	0,0227
I''_2, А	(14-242)	56,49	113,81	173,52	237,1	306,4
I_{a1}, А	(14-243)	58,04	114,69	172,48	231,8	292,8
$I_{р1}$, А	(14-244)	46,08	55,82	73,26	100,0	138,7
I_1, А	(14-245)	74,1	127,6	187,3	252,4	323,9
$\cos\varphi$	(14-246)	0,783	0,899	0,921	0,918	0,904
$P_{м1}$, Вт	(14-255)	510,6	1514,2	3262,6	5924,6	9756,7
$P_{м2}$, Вт	(14-256)	248,9	1010,1	2348,5	4384,9	7325,1
ΣP, Вт	(14-257)	3675,9	5751,3	9167,1	12401,4	21313,2
P_1, Вт	(14-258)	66175,9	130751,3	196667,1	264201,4	333813,6
η, %	(14-259)	94,44	95,60	95,34	94,62	93,62

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДИФИКАЦИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ НА БАЗЕ ОСНОВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СЕРИИ

16-1. ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИЙ

В гл. 6 дан подробный перечень модификаций асинхронных двигателей, выполняемых на базе двигателей основного исполнения серии. Наибольшие отклонения по расчетным данным от двигателей основного исполнения имеют двигатели с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, с переключением чисел полюсов и однофазные двигатели. При этом последние две из названных модификаций отличаются в основном по выполнению обмоток статора и могут отличаться частично по данным ротора; первые две модификации отличаются, как правило, конструкцией ротора: двигатели с повышенным пусковым моментом имеют двойную клетку, а пазы двигателей с повышенным скольжением имеют меньшую площадь поперечного сечения по сравнению с основным исполнением и заливаются алюминиевым сплавом марки АКМ12-4.

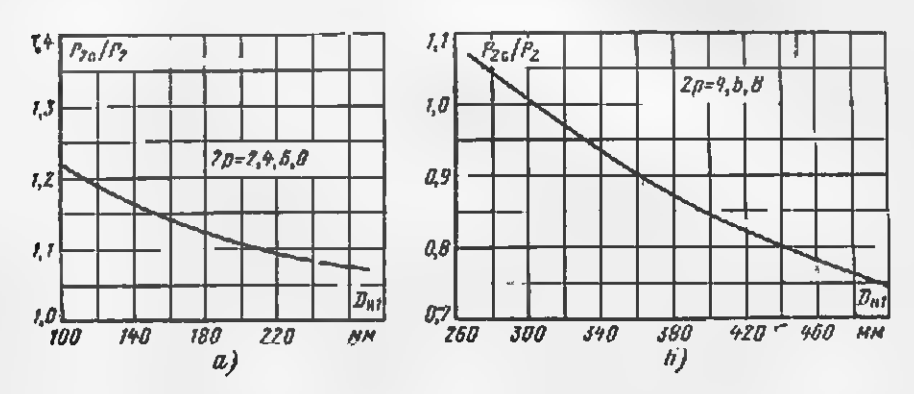


Рис. 16-1. Зависимость $P_{2c}/P_2=f(D_{н1})$.

а — для двигателей с $D_{н1}=100 \div 270$ мм; *б* — для двигателей с $D_{н1}=270 \div 500$ мм.

Остальные модификации и специализированные исполнения двигателей, перечисленные в гл. 6, либо имеют в своей основе вышеуказанные пять исполнений (включая основное) с некоторым возможным отличием по числу витков обмотки статора (уменьшением числа витков), либо отличаются конструкцией отдельных элементов, изоляционными материалами для витковой и корпусной изоляции, пропиточными лаками и защитными покрытиями обмоток, а также защитными покрытиями узлов и деталей конструкции против вредных воздействий окружающей среды (см. табл. 6-1).

Особо следует отметить, что для всех модификаций и специализированных исполнений применяется сердечник статора двигателей основного исполнения с сохранением размеров наружного и внутреннего диаметров, длины, числа и размеров пазов.

Ниже приводится методика расчета двигателей с повышенным пусковым моментом и двигателей с повышенным скольжением, как наиболее характерных и наиболее широко применяемых модификаций двигателей основного исполнения. Основные технические требования, предъявляемые к двигателям этих модификаций, приведены в § 6-2.

Мощность двигателей с повышенным пусковым моментом соответствует мощности двигателей основного исполнения. Мощность двигателей с повышенным скольжением может быть несколько понижена или повышена по сравнению с мощностью двигателей основного исполнения, особенно — на участке высот оси вращения до 132 мм. Средняя степень изменения мощности приведена на кривых рис. 16-1, где коэффициент $k=P_{2c}/P_2$; P_{2c} — номинальная мощность двигателя с повышенным скольжением. Номинальные значения мощности P_{2c} относятся к ПВ=40%, и могут не совпадать со значениями мощности стандартной твердой шкалы. P_2 — номинальная мощность исходного двигателя основного исполнения.

16-2. ДВИГАТЕЛИ С ПОВЫШЕННЫМ ПУСКОВЫМ МОМЕНТОМ

Все размеры сердечника статора, а также число пазов ротора, принимают такими же, как у двигателя основного исполнения соответствующего типоразмера (см. гл. 14). Такими же предварительно принимают и расчетные параметры обмотки статора.

Форма паза ротора соответствует рис. 16-2,*а*, *б*. Обмотка ротора выполняется заливкой алюминием, как и у двигателя основного исполнения; размеры короткозамыкающих колец и вентиляционных лопаток ротора остаются неизменными.

Размеры паза, мм, и площади поперечного сечения, мм², клеток определяют в следующем порядке.

Высоту паза $h_{п2}$ принимают равной высоте паза двигателя основного исполнения (см. рис. 14-13).

Поперечное сечение стержня двойной клетки $q_{ст.д}$ предварительно принимают равным примерно 85% сечения стержня двигателя основного исполнения, т. е.

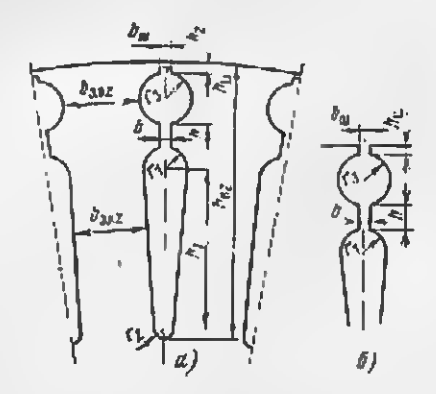


Рис. 16-2. Форма паза ротора двигателя с двойной клеткой.
а — закрытого; *б* — полузакрытого.

$$q_{ст.д} \approx 0{,}85 q_{от}. \qquad (16\text{-}1)$$

Площади поперечного сечения стержней двойной клетки:

$$\left.\begin{aligned} q_{ст.в} &= q_{ст.д}\alpha/(1+\alpha); \\ q_{ст.н} &= q_{ст.д}/(1+\alpha), \end{aligned}\right\} \qquad (16\text{-}2)$$

где $q_{ст.в}$, $q_{ст.н}$ — сечения стержней верхней и нижней клеток; $\alpha = q_{ст.в}/q_{ст.н}$ — по рис. 16-3.

Высота перемычки между стержнями, мм,

$$h = b\beta, \qquad (16\text{-}3)$$

где $\beta = h/b$ — по рис. 16-4; размер b принимают равным 2 мм (минимально допустимый для штампа и по условиям заливки).

Радиус верхнего стержня

$$r_3 = \sqrt{q_{ст.в}/\pi}. \qquad (16\text{-}4)$$

Больший радиус нижнего стержня

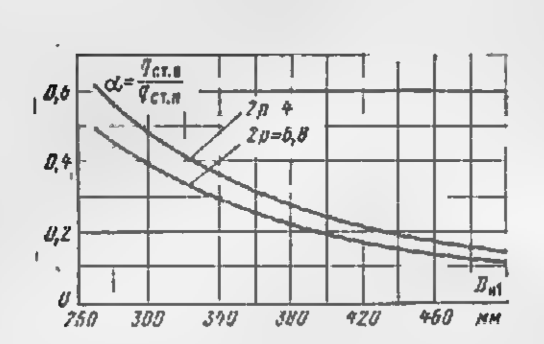
$$r_1 = \frac{\pi (D_{н2} - 2h_ш - 2h_2 - 4r_3 - 2h) - Z_2 b_{з.н2}}{2(Z_2 + \pi)}, \qquad (16\text{-}5)$$

где $h_ш$=0,7 мм; h_2=0,7 мм (для паза по рис. 16-1,б h_2=0); $b_{з.н2}=b_{з2}$ двигателя основного исполнения, по (14-54).

Меньший радиус нижнего стержня r_2 — по (14-59).

Расстояние между центрами радиусов

$$h_1 = h_{п2} - h_ш - h_2 - 2r_3 - h - r_1 - r_2. \qquad (16\text{-}6)$$



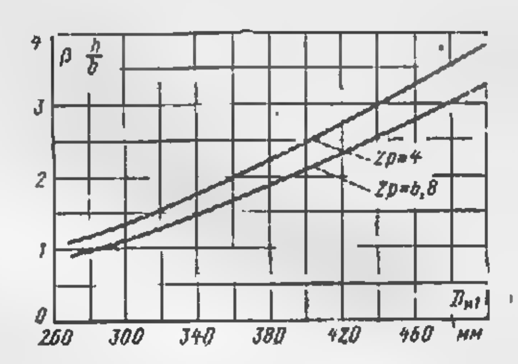


Рис. 16-3. Зависимость $\alpha = q_{ст.в}/q_{ст.н} = f(D_{н1})$.

Рис. 16-4. Зависимость $\beta = h/b = f(D_{н1})$.

По полученным значениям r_1, r_2 и h_1 необходимо подсчитать площадь поперечного сечения нижнего стержня $q_{ст.н}$ по (14-61) и сравнить результат с (16-2). В случае расхождения следует скорректировать размеры r_1, r_2 и h_1, соответственно увеличивая или уменьшая радиусы r_1 и r_2 на одинаковое значение Δr и изменяя h_1 при условии $h_1 + r_1 + r_2 = \text{const}$. После этого следует определять ширину зубца $b_{з.н2}$ и значение индукции $B_{з.н2}$ по (14-54).

Активное сопротивление стержня верхней клетки определяют по (14-108); при этом ввиду малой приведенной высоты стержня принимают при $f_2 \leqslant 50$ Гц коэффициент вытеснения тока верхней клетки с круглыми стержнями $k_{в.т.в}=1$. Для режимов работы при $f_2 > 50$ Гц $k_{в.т.в} = 1 + \varphi'$, где φ' — по кривой рис. 14-21, а ξ по (14-110).

Активное сопротивление стержня нижней клетки находят по (14-131), где $k_{в.т.н}$ определяют как для простой алюминиевой клетки по (14-111)—(14-114).

Взаимное активное сопротивление стержней, Ом,

$$r_{ст.в.н} = r_{ст.в}\varphi''/k_{в.т.в}, \qquad (16\text{-}7)$$

где коэффициент φ'' определяют по рис. 14-21 в зависимости от приведенной высоты стержня верхней клетки ξ.

При расчете режимов в диапазоне скольжений $0<s\leq 1$ можно принять $r_{ст.в.н}=0$ ввиду относительно малой приведенной высоты стержня верхней клетки.

Активное сопротивление короткозамыкающих колец $r_{кл}$, приведенное к току стержня, определяют по (14-115); значение этого сопротивления может быть взято из расчета двигателя основного исполнения.

Активные сопротивления ротора, приведенные к статору, Ом:

верхней клетки

$$r'_{в}=k_{пр1}(r_{ст.в}-r_{ст.в.н}); \qquad (16\text{-}8)$$

нижней клетки

$$r'_{н}=k_{пр1}(r_{ст.н}+r_{ст.в.н}); \qquad (16\text{-}9)$$

общей цепи ротора

$$r'_{0}=k_{пр1}(r_{кл}+r_{ст.в.н}). \qquad (16\text{-}10)$$

Коэффициент проводимости рассеяния паза нижней клетки

$$\lambda_{пн}=\left[\frac{h_1+0,8r_2}{6r_1}\left(1-\frac{\pi r_1^2}{2q_{ст.н}}\right)^2+0,66-\frac{b}{4r_1}\right]\phi+$$

$$+\left(0,785-\frac{b}{4r_1}\right)\psi'+\frac{h}{b}, \qquad (16\text{-}11)$$

где коэффициенты ψ и ψ' — по рис. 14-21; ψ — в зависимости от ξ нижней клетки, ψ' — от ξ верхней клетки.

Коэффициент проводимости рассеяния взаимной индукции:

для паза по рис. 16-1,*а*

$$\lambda_{вз.в}=\left(0,785-\frac{b_ш}{4r_1}\right)\psi'+0,3+1,12\frac{h_2}{I_2}10^3; \qquad (16\text{-}12)$$

для паза по рис. 16-1,*б*

$$\lambda_{вз.в}=\left(0,785-\frac{b_ш}{4r_1}\right)\psi'+\frac{h_ш}{b_ш}, \qquad (16\text{-}12а)$$

где I_2 для рабочего режима определяют по (14-123), ψ' — по рис. 14-21 в зависимости от ξ верхней клетки.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{д2}$ рассчитывают по (14-124); коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец $\lambda_{кл}$ — по (14-125); коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора — по (14-138); приведенные к статору индуктивные сопротивления нижней клетки $x'_{н}$ и общей цепи ротора x'_{0} — по (14-139) и (14-140).

Результирующие сопротивления ротора, приведенные к статору, определяют в соответствии со схемой замещения ротора, представленной на рис. 14-23.

Активное результирующее сопротивление, Ом,

$$r'_{2}=r'_{0}+r'_{н}\theta_{н}+\varepsilon_{д}\Delta x'_{д}. \qquad (16\text{-}13)$$

Индуктивное результирующее сопротивление, Ом,

$$x'_{2}=x'_{0}+x'_{н}\theta^2_{н}-\Delta x'_{д}. \qquad (16\text{-}14)$$

Здесь

$$\theta_д = r'_п/(r'_в + r'_д);\ \varepsilon_д = (r'_в + r'_д)/x'_в;\ \Delta x'_д = x'_в\theta^2_д/[1 + (\varepsilon_д/s)^2].$$

При расчете рабочего режима $\Delta x'_д = 0$.

Намагничивающий ток рассчитывают по § 14-7, причем магнитное напряжение зубцов ротора определяют в следующем порядке.

Средняя ширина зубца верхней части паза, мм,

$$b_{з.в2} = t_{2(1/3)} - 1{,}88 r_з, \tag{16-15}$$

где $t_{2(1/3)}$ — зубцовое деление, мм;

$$t_{2(1/3)} = \frac{\pi}{Z_2}(D_{н2} - 2h_ш + 2h_2 + 2{,}67 r_з).$$

Магнитная индукция в среднем сечении зубца верхней части паза $B_{з.в2}$ — по (14-54). Напряженность магнитного поля в зубце, если она не превышает 1,8 Т, определяют из приложений 18, 19.

Расчетная длина магнитной силовой линии, мм,

$$L_{з.в2} = 1{,}8 r_з + h_ш. \tag{16-16}$$

Магнитное напряжение зубцов верхней части паза $F_{з.в2}$ — по (14-179).

Расчет магнитного напряжения зубцов нижней части паза выполняется так же, как и у бутылочного паза, т. е. по § 14-7,г.

Магнитное напряжение зубцов ротора $F_{з2}$ — по (14-183). Холостой ход рассчитывают по § 14-9; номинальный режим и рабочие характеристики — по § 14-10; начальный пусковой момент и начальный пусковой ток — по § 14-11; максимальный момент — по § 14 12.

Уменьшение проводимости рассеяния вследствие насыщения при пуске определяют в соответствии с § 14 11. При этом: для паза по рис. 16-1,а проводимость $\lambda_{2п\,п.нер}$ рассчитывают по (14-267); индуктивное сопротивление рассеяния, зависящее от насыщения, $x_{пер}$ — по (14-271); индуктивное сопротивление рассеяния, не зависящее от насыщения, Ом,

$$x_{пост} = x'_1\frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_0\frac{\lambda_{20} - \lambda_{2пер}}{\lambda_{20}} + x''_н\theta^2_д - \Delta x''_д, \tag{16-17}$$

где $\Delta x''_д = \Delta x'_д(1+\tau_1)^2$; τ_1 — определяется по (14-205); $\theta_д$ и $\Delta x'_д$ — по (16-14).

Расчетный ток ротора $I''_{п2}$ определяют по (14-275) с заменой коэффициента при $x_{пер}$, равного 0,0825, на коэффициент, равный 0,25.

Для паза по рис. 16-1,б проводимость $\lambda_{2п\,п.пер}$ рассчитывают по (14-265); индуктивные сопротивления: $x_{пер}$ — по (14-271), $x_{пост}$ — по (16-17); ток $I''_{п2}$ — по (14-275).

Расчет параметров двигателя в зоне максимального момента с учетом насыщения проводят в соответствии с § 14-12 с учетом указанных выше особенностей.

Расчетный ток ротора $I''_{м2}$ для паза по рис. 16-1,а определяют по (14-282) с заменой коэффициента при $x_{пер}$, равного 0,0825, на коэффициент, равный 0,25.

Расчетный ток ротора $I''_{м2}$ для паза по рис. 16-1,б определяют по (14-282).

Если расчетный максимальный момент не удовлетворяет техническим требованиям, следует несколько уменьшить $x'_н$, т. е. уменьшить отношение β в (16-3) за счет увеличения размера b, и повторить расчет двигателя.

Если расчетный начальный пусковой момент не удовлетворяет техническим требованиям, следует увеличить отношение α в (16-2) за счет увеличения $q_{ст.в}$ и уменьшения $q_{ст.н}$ при условии $q_{ст.д}=\text{const}$, а также одновременно увеличить $x'_н$ за счет увеличения отношения β, чтобы было выдержано условие $x'_н 0^3_д=\text{const}$. После этого повторить расчет двигателя. Если эти мероприятия не приведут к необходимому результату, то следует несколько повысить магнитный поток двигателя, т. е. соответственно уменьшить число витков обмотки статора.

Все остальные расчеты выполняют по соответствующим разделам методики, приведенной в гл. 14.

16-3. ДВИГАТЕЛИ С ПОВЫШЕННЫМ СКОЛЬЖЕНИЕМ

Все размеры сердечника статора, а также число пазов ротора, принимают такими же, как у двигателя основного исполнения соответствующего типоразмера (см. гл. 14). Такими же предварительно принимают и расчетные параметры обмотки статора.

Форма паза ротора соответствует рис. 14-12,*а* или *б*. Обмотка ротора выполняется заливкой алюминиевым сплавом марки АКМ12-4 (ГОСТ 1521-68) с удельной проводимостью $\gamma_{20}=15$ См/мкм (при 20°С); при расчетной рабочей температуре $\gamma_{75}=11$, γ_{115}—10 См/мкм (с учетом примечания к табл. 14-29).

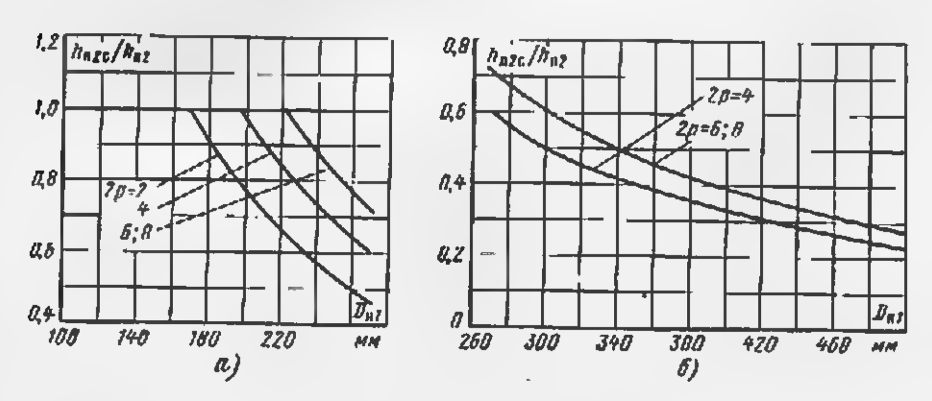


Рис. 16-5. Зависимость $h_{п2с}/h_{п2}=f(D_{н1})$.
а — для двигателей с $D_{н1}$=100÷270 мм; *б* — для двигателей с $D_{н1}$=270÷500 мм

Если окажется, что применение указанного сплава не обеспечивает скольжение двигателя на заданном уровне, уменьшают площадь поперечного сечения паза ротора за счет изменения его высоты, при этом верхняя часть паза, а следовательно, и ширина зубца остаются неизменными.

Площадь поперечного сечения паза предварительно можно определить, исходя из необходимого для выполнения технического требова-

ния $s_м \geq 0{,}4$ значения сопротивлениия обмотки ротора r''_{2c}, которое по (14-290) должно быть равно, Ом,

$$r''_{2c} - 0{,}4z_{\infty}.$$

Значение z_{∞} с учетом насыщения может быть предварительно взято из расчета максимального момента исходного двигателя основного исполнения.

Зная r''_{2c}, определим сечение стержня ротора, мм,

$$q_{ст.с} = q_{ст} r''_{2} \gamma_{\theta} / r''_{2c} \gamma_{\theta c}. \qquad (16\text{-}18)$$

Здесь принятый в обозначениях дополнительный индекс «с» соответствует параметрам двигателя с повышенным скольжением.

Выбирают предварительную высоту паза, пользуясь кривой рис. 16 5. Большой радиус паза r_1 принимают таким же, как у двигателя основного исполнения, остальные размеры и площадь поперечного сечения паза в штампе определяют по (14-59)—(14-61).

Активное сопротивление стержня ротора определяют по (14-108). При этом принимают $k_{в\,т}=1$, так как значение ξ, рассчитанное по (14-109), при $s \leq 1$ всегда меньше или равно единице, поскольку высота паза $h_{п2с}$ практически не превышает 20 мм.

Сечение и размеры короткозамыкающих колец определяют по обычной методике по (14-75) и (14-77).

Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, определяют по (14-115) с учетом указанных выше значений γ_{θ}.

Остальные расчеты выполняют по методике, приведенной в гл. 14.

В том случае, если скольжение при максимальном моменте, рассчитанное по (14-290), не будет удовлетворять требованию $s_м \geq 0{,}4$, то следует увеличить сопротивление r''_{2c} путем дальнейшего уменьшения сечения паза.

После корректировки сопротивления r''_{2c} следует подобрать соответствующие сечения и размеры паза ротора и повторить расчет двигателя.

Глава семнадцатая

РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОСНОВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СЕРИИ

17-1. СЕРДЕЧНИКИ ЯКОРЯ И ПОЛЮСОВ, СТАНИНЫ

а) Сердечники якоря

Сердечники якоря собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, изолированных после штамповки лаковым покрытием. Пазы якоря овальные полузакрытые (рис. 17-1) или прямоугольные открытые (рис. 17-2). Преимущество и недостатки каждого из указанных видов пазов были рассмотрены в § 14-1.

Рекомендуются следующие марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали для листов сердечника якоря, форма пазов и тип обмотки.

h, мм	$U_{н}$, В	Марка стали	Пазы (форма)	Тип обмотки
80—200	≤600	2013	Полузакрытые овальные	Двухслойная всыпная
225—315	≤600	2312	Прямоугольные открытые	Двухслойная из жестких секций
355—500	≤1000	2411	То же	То же

Коэффициент заполнения сталью сердечника якоря k_c=0,95.

Для двигателей с h=80÷200 мм может также применяться сталь марки 2211, о достоинствах и недостатках которой было указано в § 14-1.

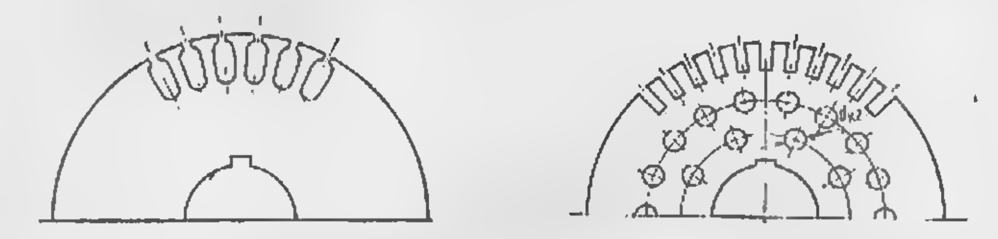


Рис. 17-1. Лист сердечника якоря с овальными полузакрытыми пазами.

Рис. 17-2. Лист сердечника якоря с прямоугольными открытыми пазами и аксиальными вентиляционными каналами.

Число пазов якоря зависит от наружного диаметра якоря, от типа и условий выполнимости обмотки (см. § 17-3).

Размеры пазов якоря на отдельном отштампованном листе (размеры в штампе) отличаются от размеров пазов в собранном сердечнике (размеры в свету) на размер припуска (табл. 17-1).

Таблица 17-1

Припуск на сборку сердечников якоря при штамповке компаундным или пазным штампами

h, мм	Припуск, мм			
	по ширине паза b_c, мм		по высоте паза h_c, мм	
	компаундный штамп	пазный штамп	компаундный штамп	пазный штамп
80—132	0,1	0,15	—	—
160—200	0,2	0,25	—	—
225—315	0,3	0,35	0,3	0,35
355—500	0,35	0,4	0,3	0,35

Листы якоря двигателей с высотами оси вращения до 200 мм, как правило, штампуют компаундным штампом. Для двигателей с h=225÷315 мм также могут применяться компаундные штампы, а начиная с высоты оси вращения 355 мм, обычно используют пазные штампы.

Для снижения магнитного шума, а также для повышения устойчивости работы двигателей при низкой частоте вращения пазы якорей двигателей с высотами оси вращения $h \leqslant 100$ мм и $2p=2$ скашивают на 1/2 зубцового деления; у двигателей с $2p=4$ для всех высот оси вращения скос пазов может быть равен целому зубцовому делению.

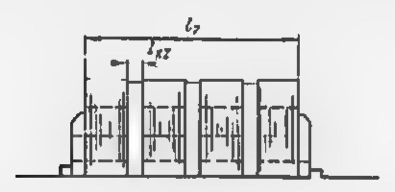


Рис. 17-3. Сердечник якоря с радиальными вентиляционными каналами.

В сердечниках якорей двигателей исполнений по степени защиты IP22 и IP44 при $h \geqslant 225$ мм предусматривают аксиальные вентиляционные каналы (рис. 17-2), которые улучшают охлаждение двигателей, снижают их массу, а также динамический момент инерции якоря. Каналы могут располагаться в один или два ряда.

У двигателей с $h \geqslant 355$ мм при длине сердечника якоря более 350 мм предусматривают радиальные вентиляционные каналы (рис. 17-3).

б) Сердечники главных полюсов

Сердечники главных полюсов целесообразно собирать из листов анизотропной электротехнической стали марки 3411 толщиной 1,0 мм. Листы сердечника не изолируют; коэффициент заполнения сердечника сталью $k_c=0,98$.

Анизотропная сталь благодаря повышенной магнитной проницаемости вдоль проката уменьшает магнитное напряжение участка главного полюса. Соответственно при штамповке листов должно учитываться

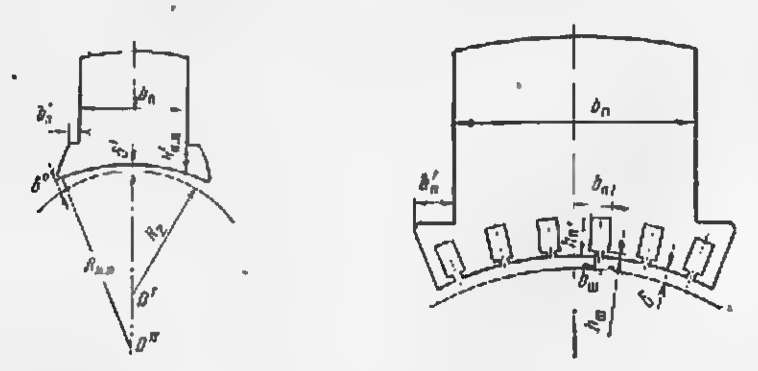


Рис. 17-4. Лист главного полюса при эксцентричном воздушном зазоре.

Рис. 17-5. Лист главного полюса двигателя с компенсационной обмоткой при концентричном воздушном зазоре.

обязательное совпадение направления проката с направлением прохождения магнитного потока в сердечнике полюса. Высокая анизотропия уменьшает размагничивающее действие реакции якоря, а также снижает магнитное рассеяние добавочных полюсов.

Форма полюсного наконечника определяет характер воздушного зазора между якорем и главными полюсами, зависящий от условий работы двигателя и от его размеров, т. е. от высоты оси вращения. При высотах оси вращения 80—315 мм целесообразно применять эксцентричный зазор, при котором центры радиусов якоря и полюсной дуги не совпадают (рис. 17-4); при этом зазор под серединой полюсной дуги наименьший, а к краю полюса постепенно увеличивается. Эксцентричный зазор уменьшает размагничивающее действие реакции якоря и понижает уровень магнитного шума двигателя.

У двигателей с высотами оси вращения 355—500 мм в наконечнике полюса штампуют прямоугольные открытые или полузакрытые пазы, предназначенные для размещения компенсационной обмотки; воздушный зазор у этих двигателей концентричный, одинаковый по всей длине полюсной дуги (рис. 17-5).

в) Сердечники добавочных полюсов

Сердечники и наконечники добавочных полюсов двигателей с высотами оси вращения 80—132 мм целесообразно выполнять из полосовой стали марки Ст3 (рис. 17-6,*а*). В двигателях с высотами оси вращения 160 мм и более сердечники добавочных полюсов, как и главных, рекомендуется собирать из штампованных листов электротехнической стали марки 3411 толщиною 1,0 мм, с коэффициентом заполнения сердечника сталью k_c=0,98.

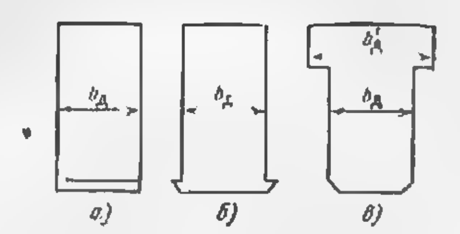


Рис. 17-6. Добавочные полюсы двигателей с различными высотами оси вращения.
а — h=80÷132 мм; *б* — h=160÷315 мм; *в* — h=355÷500 мм.

У двигателей с высотами оси вращения 160—315 мм сердечники добавочных полюсов шихтуют поперек оси двигателя, образуя по краям полюса площадки для упора обмотки при ее креплении (рис. 17-6,*б*).

У двигателей с высотами оси вращения 355—500 мм сердечники добавочных полюсов шихтуют также поперек оси двигателя; сердечники имеют Т-образную форму, снижающую магнитную индукцию в наиболее насыщенной части полюса, а также создающую бо́льшую механическую прочность крепления полюсов к станине (рис. 17-6,*в*).

г) Станины

Станины двигателей с h=80÷200 мм выполняют из стальных цельнотянутых труб, а с h=225÷315 мм обычно гнутыми из стального листа марки Ст3. Станины двигателей с h=355÷500 мм, работающих с часто повторяющимися кратковременными перегрузками, выполняют шихтованными из сегментов стали марки 2312 толщиною 1,0 мм. Коэффициент заполнения сталью k_c=0,98. Для лучшего использования внутреннего пространства двигателя целесообразно выполнение шихтованной станины восьмигранной формы.

а) Основные размеры

Материалы § 12-6 дают возможность определить рациональную структуру проектируемой серии или участка серии (если серия подразделяется на участки) для данной частоты вращения, степени защиты и способа охлаждения; при этом используются формулы, базирующиеся на принимаемых значениях коэффициента K, показателя степени $2+\gamma'$ и отношения λ. В указанном параграфе приведена методика определения основных размеров опорных двигателей, обычно наименьшего и наибольшего по мощности для данного отрезка или участка серии. Подробный расчет этих двигателей дает возможность определить значения K и $2+\gamma'$, характерные для данного участка серии, в результате чего могут быть установлены основные размеры всех промежуточных двигателей этого участка.

Проектирование двигателей серии со стандартной шкалой мощностей, с одним и тем же способом охлаждения и на одну и ту же частоту вращения, с превышением температуры по установленной норме не связано с какими-либо затруднениями; длины сердечников при этом определяются однозначно.

При отличии степени защиты, способа охлаждения, частоты вращения определение основных размеров может осуществляться следующими путями:

1) с применением расчетных длин сердечников и сохранением примерно одинакового уровня использования активных частей машины. При этом целесообразна возможная унификация длин, близких по своим значениям;

2) с применением одной и той же длины сердечника. Однако при этом следует отметить, что если бы эффективность охлаждения двигателей с самовентиляцией не зависела от способа охлаждения и частоты вращения, а коэффициенты нарастания частот вращения и номинальных мощностей (что приблизительно соответствует коэффициентам нарастания соответствующих подводимых мощностей) совпадали, то осуществление стандартной шкалы мощностей при одной и той же длине сердечника было бы возможным при практически одинаковом превышении температур частей двигателя. В действительности же указанные коэффициенты нарастания у двигателей мощностью до 200 кВт, выполняемых в основном на частоты вращения от 750 до 3000 об/мин, большей частью не совпадают (табл. 17-2 и 17-3).

Кроме того, эффективность охлаждения двигателей с самовентиляцией изменяется в зависимости от частоты вращения. В результате у данного типоисполнения двигателя с одной и той же длиной сердечника создается известная перегрузка или недогрузка при разных частотах вращения. Если при этом все же применяется одна длина сердечника, то она должна иметь такое значение, чтобы при частоте вращения, соответствующей наибольшей нагрузке, активные части не нагревались выше установленной нормы; длина двигателя определяется этой наибольшей длиной.

Недостатком этого варианта является дополнительный расход материалов, а достоинством — упрощение производства. Для двигателей постоянного тока мощностью до 200 кВт, изготовляемых в сравнении с асинхронными двигателями в значительно меньших количествах, указанный вариант является более приемлемым. В некоторых случаях дви

гатели с одной и той же длиной сердечника имеют для отдельных исполнений изоляцию разных классов нагревостойкости, однако, в производстве это вызывает существенные осложнения.

Для двигателей мощностью более 200 кВт с частотами вращения от 160 до 1000 об/мин коэффициенты нарастания частоты вращения и мощностей совпадают и равны 1,25. Вследствие применения для таких двигателей независимой вентиляции эффективность охлаждения практически не зависит от частоты вращения и поэтому при переходе на соседнюю частоту вращения мощность двигателей понижается или повышается соответственно на одну (или более) ступень шкалы с сохранением при одних и тех же длинах сердечников приблизительно одинакового превышения температур активных частей двигателей.

Таблица 17-2

Коэффициенты нарастания стандартных значений частот вращения двигателей постоянного тока мощностью до 200 кВт

n, об/мин	Коэффициент нарастания	n, об/мин	Коэффициент нарастания
500	—	1500	1,5
600	1,2	2200	1,46
750	1,25	3000	1,36
1000	1,36		

Таблица 17-3

Коэффициенты нарастания стандартных значений мощностей $k_{н.мз}$

P_2, кВт	$k_{н.мз}$	P_2, кВт	$k_{н.мз}$	P_2, кВт	$k_{н.мз}$
0,25	—	5,5	1,37	45	1,21
0,37	1,48	7,5	1,36	55	1,22
0,55	1,49	11	1,47	75	1,36
0,75	1,36	15	1,36	90	1,2
1,1	1,47	18,5	1,23	110	1,22
1,5	1,36	22	1,19	132	1,2
2,2	1,46	30	1,36	160	1,21
3,0	1,36	37	1,23	200	1,25
4,0	1,33				

Таблица 17-4

Средние поправочные коэффициенты для к. п. д. двигателей постоянного тока

Высота оси вращения h, мм	Рекомендуемый класс изоляции	Поправочные коэффициенты при переходе на изоляцию класса нагревостойкости		
		B	F	H
80—90	B	1,0	0,93	0,87
100—112		1,0	0,95	0,90
132		1,0	0,95	0,93
160—180		1,0	0,97	0,94
200		1,0	0,975	0,95
225—250	F	1,03	1,0	0,98
280—315		1,025	1,0	0,985
355—400		1,015	1,0	0,99
450—560		1,01	1,0	0,995

Серии двигателей постоянного тока мощностью до 200 кВт обычно проектируют с двумя длинами сердечника на одном диаметре. Из шкалы мощностей серии или участка серии выбирают две соседние мощности и определяют для каждой из них подводимую мощность, Вт,

$$P_1 = P_2/\eta. \qquad (17\text{-}1)$$

Предварительные значения η принимают по рис. 5-3 в зависимости от степени защиты, способа охлаждения, частоты вращения двигателя, при изоляции класса нагревостойкости B (для двигателей с $h=80\div200$ мм) и F (для двигателей с $h=225\div500$ мм), используемой по нагреву. Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения η из рис. 5-3 умножают на поправочные коэффициенты (табл. 17-4).

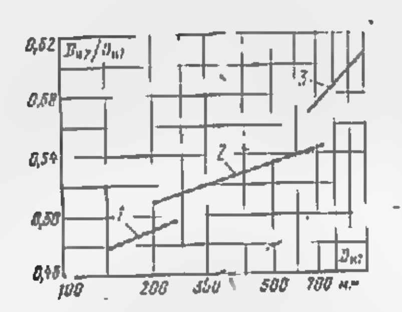


Рис. 17-7. Средние значения $D_{н2}/D_{н1}=f(D_{н1})$ двигателей постоянного тока в исполнениях IP22 и IP44.

1 — $2p=2$; *2* — $2p=4$: некомпенсированные двигатели; *3* — $2p=4$, компенсированные двигатели.

По приложению 3 выбирают стандартную высоту оси вращения, причем в качестве начального этапа используют современный уровень увязки мощностей с высотами оси вращения двигателей (см. § 2-1).

По данным рис. 11-2 находят для выбранной высоты оси вращения значения h_2, а по (11-3) значение $D_{н1макс}$. По рис. 17-7 определяют среднее отношение $D_{н2}/D_{н1}$ и вычисляют значение $D_{н2макс}$.

Как было указано в § 14-2, при достаточно большом количестве двигателей становится рентабельной штамповка якорных листов из резаных лент электротехнической стали необходимой ширины. В этом случае ширина ленты $b_{р.с}$ определяется при заданной высоте оси вращения двигателя максимальным допустимым наружным диаметром якоря $D_{н2макс}$ и припуском на штамповку $\Delta_{шт}$. В табл. 17-5 приведены значения $D_{н2макс}$, соответствующие стандартным высотам оси вращения $h\leq315$ мм, значения $\Delta_{шт}$ и $b_{р.с}$.

При $h>315$ мм выпуск двигателей относительно невелик, поэтому для штамповки якорных листов таких двигателей применяют рулонную электротехническую сталь. Исходя из заданного значения h, определяют вышеуказанным способом $D_{н2макс}$, а затем — ближайший меньший к нему наружный диаметр якорных листов $D_{н2}$, получаемый из стандартных рулонов с минимальными отходами. В табл. 17-6 приведены указанные значения диаметров $D_{н2}$ для стандартных высот оси вращения $h>315$ мм. При этом следует учитывать, что применение таких наружных диаметров якоря при заданных значениях h в ряде случаев существенно снижает использование якоря, а следовательно, и всего двигателя.

В отличие от асинхронных двигателей параметры двигателей постоянного тока, включая отношение P_1/P_2, выражены далее в зависимости от $D_{н2}$, исходя из того, что соотношение между $D_{н2}$ и $D_{н1}$ может

Таблица 17-5

Наружные диаметры якоря $D_{н2макс}$ и соответствующая им ширина резаных лент электротехнической стали

h, мм	h_z, мм	$D_{н1макс}$, мм	$2p$	$D_{н2}/D_{н1}$	$D_{н2макс}$, мм	$\Delta_{шт}$, мм	Ширина ленты $b_{р.с}$, мм
80	4	152	2	0,48	73	4	77
90	5	170	2	0,485	82	4	86
100	5	190	2	0,49	93	4	97
112	5	214	2	0,49	105	4	109
112	5	214	4	0,51	109	4	113
132	6	252	4	0,515	130	5	135
160	6	308	4	0,52	160	5	165
180	7	346	4	0,525	181	5	186
200	7	386	4	0,525	202	5	207
225	7	436	4	0,53	230	5	235
250	8	484	4	0,535	258	5	263
280	8	544	4	0,535	290	6	296
315	9	612	4	0,54	330	6	336

Таблица 17-6

Наружные диаметры якоря $D_{н2}$ и ширина стандартной рулонной электротехнической стали

h, мм	h_z, мм	$D_{н1макс}$, мм	$2p$	$D_{н2}/D_{н1}$	$D_{н2макс}$, мм	$D_{н2}$, мм	$\delta_{шт}$, мм	Ширина рулонной стали, мм
355	9	692	4	0,575	398	398	7	860
400	10	780	4	0,585	457	457	7	1000
450	11	878	4	0,595	522	493	7	1000
500	11	978	4	0,605	592	590	10	600

Таблица 17-7

Поправочные коэффициенты для параметров двигателей постоянного тока

Высота оси вращения h, мм	Рекомендуемый класс изоляции	Параметр	Поправочные коэффициенты при изоляции класса нагревостойкости		
			B	F	H
80—200 225—500	B F	P_2/P'_2	1,0 0,86	1,16 1,0	1,28 1,1
80—200 225—500	B F	A_2	1,0 0,91	1,1 1,0	1,21 1,1
80—200 225—500	B F	B_δ	1,0 0,97	1,03 1,0	1,065 1,035
80—200 225—500	B F	$\Delta U/U$	1,0 0,91	1,1 1,0	1,19 1,085
80—200 225—500	B F	$I_ш/I$	1,0 1,125	0,89 1,0	0,85 0,955
80—200 225—500	B F	$I_п$, $I_ш$	1,0 0,91	1,1 1,0	1,21 1,1

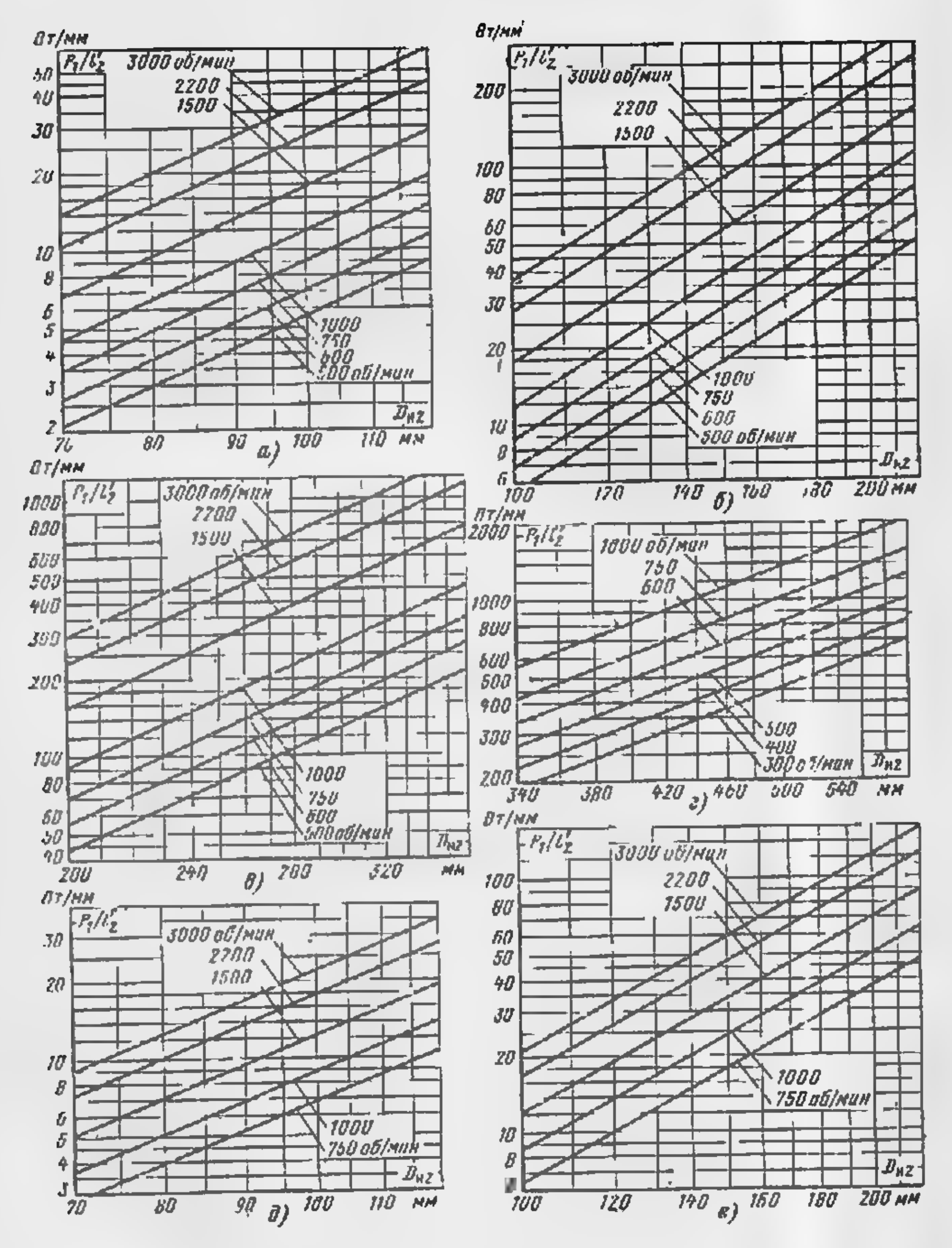


Рис. 17-8. Средние значения $P_1/l'_2=f(D_{н2})$

а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, $D_{н2}=70\div120$ мм; $2p=2$; б — то же, собом охлаждения IC17; со степенью защиты IP44 в способом охлаждения IC37; $D_{н2}=340\div600$ мм; же $D_{н2}=100\div220$ мм; $2p=4$; ж — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0041, $D_{н2}=$

несколько изменяться в зависимости от конструкции и способов размещения обмоток возбуждения. Уточненное значение $D_{н1}$ при выбранном $D_{н2}$ может быть определено после составления эскиза размещения обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов в междуполюсном окне, но не должно превышать $D_{н1макс}$.

Зависимости $P_1/l'_2=f(D_{н2})$, соответствующие современным достижениям в области электромашиностроения, показаны на рис. 17-8,*а—з*, при изоляции классов нагревостойкости В (для двигателей с $h=80\div200$ мм) и F (для двигателей с $h=225\div500$ мм). Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения P_1/l'_2, приведенные на рис. 17-8, умножаются на поправочные коэффициенты (табл. 17-7).

По рис. 17-8 определяют для выбранного значения $D_{н2}$ отношение P_1/l'_2, расчетные длины сердечника якоря $l'_2=P_1/(P_1/l'_2)$ и отношения $\lambda=l'_2/D_{н2}$. Отношение λ_2 для двигателя большей мощности (второй длины) должно по возможности приближаться к предельным значениям $\lambda_{макс}$, приведенным на рис. 17-9. Значение λ_1 для двигателя меньшей мощности **(первой длины)** не регламентируют.

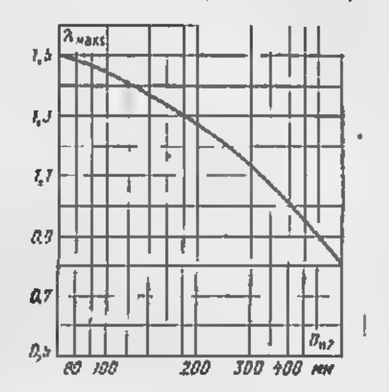
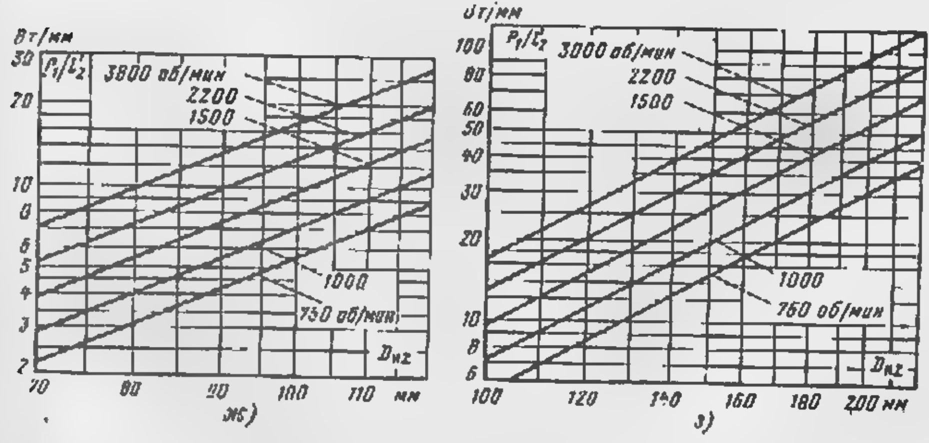


Рис. 17-9. Предельные значения $\lambda_{макс}=l'_2/D_{н2}$.

При λ_2, значительно превышающем рекомендуемые предельные значения, производят выбор основных размеров для следующей большей высоты оси вращения по приложению 3; если такой переход вызовет слишком большое снижение λ_2, может выявиться необходимость в другой группировке двух соседних мощностей либо в проектировании двигателей с одной или тремя длинами на одном диаметре. При проектировании двигателей с одной длиной на диаметре высоту оси вращения выбирают такой, чтобы она обеспечивала наибольшее приближение к предельным значениям $\lambda_{макс}$ (рис. 17-9).

Основные размеры всех других отрезков серии определяют таким



двигателей постоянного тока.

$D_{н2}=100\div220$ мм; $2p=4$; *в* — то же, $D_{н2}=200\div360$ мм; $2p=4$; *г* — со степенью защиты IP22 и спо- $2p=4$; *д* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, $D_{н2}=70\div120$ мм; $2p=2$, *е* — то $=70\div120$ мм; $2p=2$; *з* — то же $D_{н2}=100\div220$ мм; $2p=4$.

же способом, либо, как было указано выше, вычисляют основные размеры двигателей отрезков серии, находящихся на противоположных границах данного участка, находят значения величин K, $2\div\gamma'$ по методу, изложенному в § 11-2, и с их помощью определяют основные размеры всех двигателей участка серии. В отдельных случаях, в частности у тихоходных двигателей, $\lambda_{макс}$ может быть увеличено по сравнению с данными рис. 17-9 с соответствующей проверкой коммутационных параметров и механическим расчетом вала.

При проектировании двигателей с h=355÷500 мм, выпускаемых небольшими партиями при значительной номенклатуре исполнений, особое внимание уделяют унификации сборочных единиц, деталей, штампов и особенно профилей обмоточной и коллекторной меди. Указанными требованиями унификации в большой степени определяются не только значения принимаемых для серии мощностей, частот вращения и напряжений двигателей, но и значения λ, а также число длин сердечника на одном диаметре, которое может иногда достигать 3 4. Порядок расчета таких двигателей не отличается от указанного при двух длинах на одном диаметре.

При проектировании двигателей с h=80÷315 мм со степенью защиты IP22 или IP44 с независимой вентиляцией (IC17, IC37) принимают P_1/l'_2, исходя из наибольших значений, приведенных на рис. 17-8,*а*—*в* для выбранных наружных диаметров якоря, причем указанные значения изменяют пропорционально действительной частоте вращения. Например, для двигателя со степенью защиты IP22 с самовентиляцией (IC01) для $D_{н}$=200 мм наибольшее значение P_1/l'_2 при частоте вращения 3000 об/мин из рис. 17-8,*б* составляет 300 Вт/мм; если проектируют двигатель с независимой вентиляцией с частотой вращения 1000 об/мин, то P_1/l'_2 составит для него 300·1000/3000=100 Вт/мм.

Для указанных исполнений двигателей с независимой системой вентиляции принимаемые в дальнейшем значения B_δ, A_2, A_2J_2 также должны выбираться наибольшими для данного диаметра якоря соответственно по рис. 17-14,*а*—*в*, 17-25,*а*—*в* и 17-28,*а*—*в*.

При питании двигателей постоянного тока от тиристорных преобразователей в кривой напряжения и тока возникают переменные составляющие, в результате чего ухудшается коммутация (особенно в режимах глубокого ослабления поля), повышаются потери в стали и нагрев двигателя, ухудшаются условия коммутации, возникают шумы и вибрации. Особо неблагоприятное влияние оказывает пульсация напряжения и тока на работу двигателей большой мощности.

Качество выпрямленного напряжения характеризуется коэффициентом пульсации, представляющим собою отношение амплитуды первой гармонической к среднему значению выпрямленного напряжения.

Для уменьшения пульсаций двигатели с параллельным или независимым возбуждением при $h\leq$315 мм обычно питают от трехфазной мостовой схемы без сглаживающих фильтров, а для питания двигателей большой мощности ($h>$315 мм) применяют питание от 6 или 12-фазных выпрямителей со сглаживающими фильтрами.

Радикальным средством уменьшения влияния пульсаций выпрямленного напряжения на работу двигателей является применение шихтованных станин и добавочных полюсов либо снижение мощности, а также магнитной индукции в массивной станине и спинке якоря. В отечественной практике двигатели с $h\geq$160 мм изготовляют с шихтованными

добавочными полюсами, а шихтованную станину применяют у двигателей с $h>315$ мм.

При проектировании двигателей, питающихся от тиристорных преобразователей с коэффициентом пульсации напряжения более 1,1, значения P_1/l'_2, указанные на рис. 17-8, следует уменьшать примерно на 15%, а принимаемые в дальнейшем расчете для этих двигателей значения B_δ из рис. 17-14 — на 10%, A_2 из рис. 17-25 — на 5%, A_2J_2 из рис. 17-28 — на 10%.

б) Дополнительные размеры

Приближенное значение внутреннего диаметра листов якоря D_2, мм, определяемое по рис. 17-10, соответствует наименьшему возможному диаметру вала с учетом предельного допустимого λ. В дальнейшем при выполнении механического расчета вала на жесткость может быть уточнено значение D_2.

Рекомендуемые число рядов, значения $n_{к2}$ и диаметра $d_{к2}$, мм, аксиальных каналов сердечника якоря приведены в табл. 17-8.

При двух рядах каналы располагают в шахматном порядке.

Конструктивная длина сердечника якоря, мм;

при отсутствии радиальных вентиляционных каналов

$$l_2=l'_2, \tag{17-2}$$

при наличии радиальных вентиляционных каналов

$$l_2=l'_2+n_{к2}l_{к2}. \tag{17-3}$$

Число радиальных вентиляционных каналов

$$n_{к2}=n_{п2}-1.$$

Число пакетов сердечника

$$n_{п2}=l'_2/l_{п2}.$$

Длину пакета $l_{п2}$ принимают 55—75 мм; длина радиальных вентиляционных каналов $l_{к2}=10$ мм.

Значения l_2 при длине сердечника менее 100 мм округляют до ближайшего целого числа миллиметров, при большей длине — до ближайших 5 или 10 мм; соответственно изменится и l'_2.

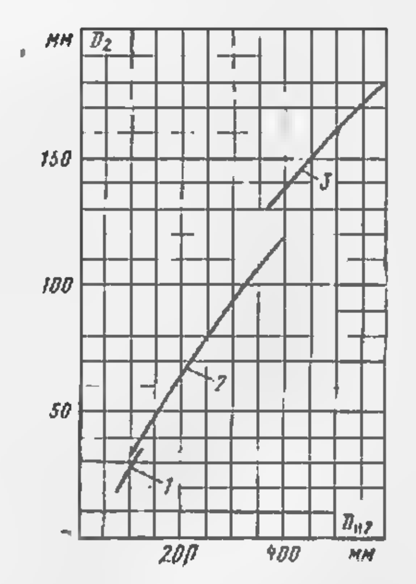


Рис. 17-10. Средние значения $D_2=f(D_{н2})$.

1 — $2p=2$, 2 — $2p=4$, $h=112\div315$ мм; 3 — $2p=4$; $h=355\div500$ мм.

Размеры зазора δ обусловлены противоречивыми требованиями. С увеличением δ уменьшается размагничивающее действие реакции якоря, улучшается скоростная характеристика двигателя, уменьшается нагрузка на вал и подшипники, однако при этом увеличиваются магнитное напряжение воздушного зазора, а следовательно, и потери в обмотке возбуждения.

Средние значения высоты воздушного зазора δ между главным полюсом и якорем, применяемые на практике, приведены на рис. 17-11.

При эксцентричном зазоре обычно $\delta''=3\delta'$, где δ' — высота зазора у оси полюса, δ'' — у края полюса. Эквивалентный зазор, принимаемый для расчета магнитной цепи из рис. 17-11, мм,

$$\delta\approx0{,}75\delta'+0{,}25\delta''; \qquad (17\text{-}4)$$

соответственно $\delta'=\delta/1{,}5$, а $\delta''=2\delta$.

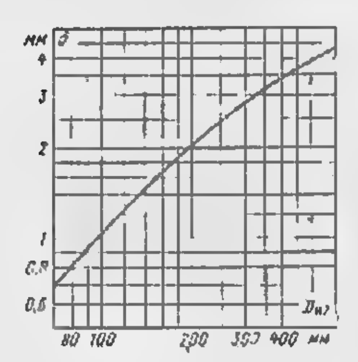
Таблица 17-8

Аксиальные каналы якоря

h, мм	Число рядов	$n_{к2}\times d_{к2}$, мм	h, мм	Число рядов	$n_{к2}\times d_{к2}$, мм
225	1	12×18	355	2	30×24
250	1	18×18	400	2	30×27
280	2	21×22	450	2	30×30
315	2	25×22	500	2	30×34

Длину сердечника главного полюса $l_п$ принимают равной l_2. Высота полюса $h_п$ должна быть достаточной для размещения обмотки возбуждения; ориентировочные значения $h_п$ в зависимости от наружного диаметра якоря приведены на рис. 17-12. При шихтованной станине указанные значения $h_п$ уменьшают на 10 мм.

Число главных полюсов влияет на технико-экономические показатели двигателя. С увеличением числа полюсов $2p$ уменьшаются поперечное сечение станины и ток, приходящийся на щеточный болт, сле-



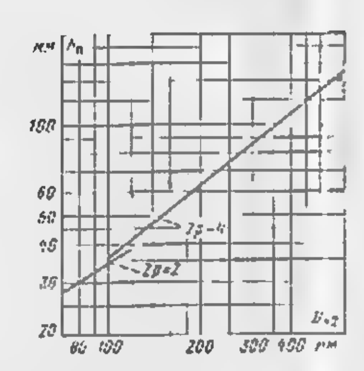


Рис. 17-11. Средние значения $\delta=f(D_{н2})$.

Рис. 17-12. Средние значения $h_п=f(D_{н2})$.

довательно, при неизменной ширине щеток уменьшаются длина коллектора, а также вылет лобовых частей обмотки якоря и длина двигателя. Однако при этом увеличивается трудоемкость изготовления двигателя, повышается среднее напряжение между коллекторными пластинами, уменьшается расстояние между главными и добавочными полюсами, в результате чего понижается допустимое значение расчетного коэффициента полюсной дуги α'. У двигателей с $w_{c2}=1$ и петлевой или лягушечьей обмоткой при уменьшении $2p$ снижается число проводников обмотки якоря и коллекторных пластин, что благоприятно сказывается на уменьшении количества изоляции в зубцовой зоне и на коммутации,

так как появляется возможность применения более широких и меньших по высоте пазов якоря.

Рекомендуются следующие числа главных полюсов, установленные практикой электромашиностроения в зависимости от высоты оси вращения двигателей: $2p=2$ при $h=80\div100$ мм и $2p=4$ при $h=112\div500$ мм.

Расчетная ширина полюсной дуги, мм,

$$b'_{н.п}=\alpha'\tau, \qquad (17\text{-}5)$$

где α' — расчетный коэффициент полюсной дуги — из рис. 17-13; τ полюсное деление, мм;

$$\tau=\pi D_{н2}/2p.$$

Ширина полюсной дуги, мм:

у некомпенсированных двигателей с эксцентричным зазором

$$b_{н.п}=b'_{н.п}, \qquad (17\text{-}6)$$

у компенсированных двигателей с концентричным зазором

$$b_{н.п}=b'_{н.п}-2\delta. \qquad (17\text{-}7)$$

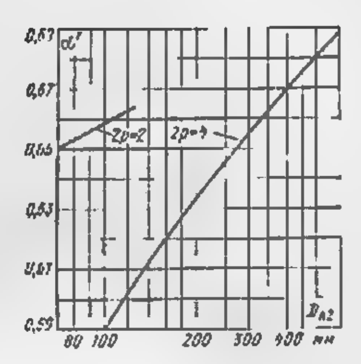


Рис. 17-13. Средние значения $\alpha'=f(D_{н2})$.

Обозначим предварительно установленную длину сердечника якоря через $l'_{2предв}$. Тогда предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре, Вб,

$$\Phi_{предв}=B_\delta b'_{н.п} l'_{2предв}\cdot10^{-6}. \qquad (17\text{-}8)$$

Средние значения магнитной индукции B_δ при изоляции класса нагревостойкости B (для двигателей с $h=80\div200$ мм) и F (для двигателей с $h=225\div500$ мм), используемой по нагреву, приведены на рис. 17-14. Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения B_δ, приведенные на рис. 17-14, умножаются на поправочные коэффициенты (табл. 17-7).

Ширина сердечника главного полюса, мм,

$$b_{п}=\frac{\sigma\Phi_{предв}}{l_{эф.п}B_{п}}10^{6}, \qquad (17\text{-}9)$$

где $l_{эф.п}=k_c l_п$; σ — коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов, принимаемый для $2p=2$ равным 1,15 и для $2p=4$ — 1,2; $B_п$ — магнитная индукция в сердечнике полюса.

Для стали марки 3411 в зависимости от исполнения двигателей принимаются следующие значения $B_п$.

Исполнение двигателей по степени защиты, способ охлаждения	Магнитная индукция $B_п$, Т
IP22, IC01	1,6—1,7
IP22, IC17	1,6—1,7
IP44, IC37	1,6—1,7
IP44, IC0141	1,4—1,5
IP11, IC0041	1,35—1,45

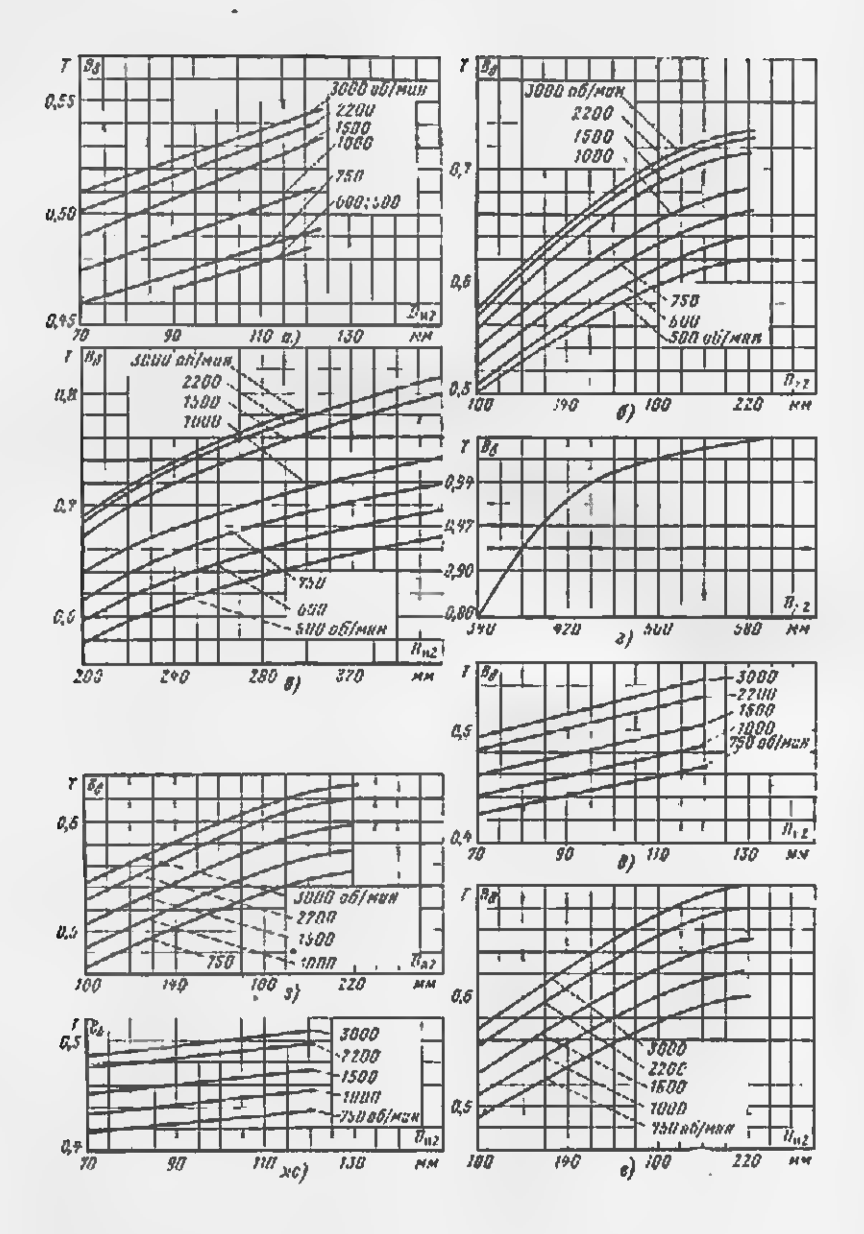


Рис 17-14. Средние значения $B_\delta = f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01; $D_{н2} = 70 \div 120$ мм; $2p = 2$; *б* — то же, $D_{н2} = 100 \div 220$ мм, $2p = 4$, *в* — то же, $D_{н2} = 200 \div 360$ мм; $2p = 4$; *г* — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17; со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37, $D_{н2} = 340 \div 600$ мм; $2p = 4$; *д* — со степенью защиты IP44; способом охлаждения IC0141; $D_{н2} = 70 \div 120$ мм; $2p = 2$; *е* — то же, $D_{н2} = 100 \div 200$ мм; $2p = 4$; *ж* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0041; $D_{н2} = 70 \div 120$ мм; $2p = 2$; *з* — то же, $D_{н2} = 100 \div 220$ мм; $2p = 4$.

На полюсных наконечниках (см. рис. 17-4, 17-5) предусматривают выступы, предназначенные для упора обмотки возбуждения при ее креплении. Ширина выступа $b'_п$ обычно находится в пределах $(0{,}07 \div 0{,}14)\,b_п$.

Высота основания у края полюсного наконечника $h'_{нп}$ (см. рис. 17-4) должна быть выбрана такой, чтобы магнитная индукция в этом сечении не превышала 85% индукции в сердечнике полюса. Предварительное значение высоты $h'_{нп}$, мм, может быть определено по формуле

$$h'_{н\,п} = (b_{н.п} - b_п)\,B_\delta/1{,}67B_п, \qquad (17\text{-}10)$$

где $b_{н.п}$ — длина дуги полюсного наконечника, мм.

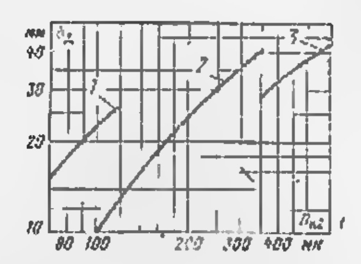
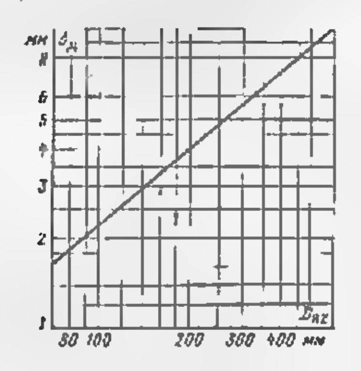


Рис. 17-15. Средние значения $b_д = f(D_{н2})$.
1 — $h = 80 \div 100$ мм; $2p = 2$, $2p_д = 1$; 2 — $h = 132 \div 315$ мм, $2p = 4$, $2p_д = 4$; 3 — $h = 355 \div 500$ мм, $2p = 4$, $2p_д = 4$.

Длину наконечника добавочного полюса $l_{н.д}$ принимают равной длине сердечника якоря l_2. Длина сердечника добавочного полюса $l_д$ двигателей с высотами оси вращения 80–132 мм короче длины сердечника якоря на 5—8 мм с каждой стороны для обеспечения упора катушки добавочного полюса; у двигателей с бóльшими высотами оси вращения длина сердечника добавочного полюса равна длине сердечника якоря.



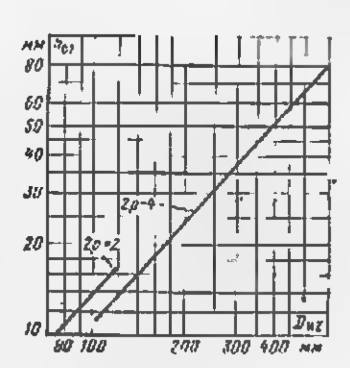


Рис. 17-16. Средние значения $\delta_д = f(D_{н2})$.

Рис. 17-17. Средние значения $h_{с1} = f(D_{н2})$.

Предварительные значения ширины добавочного полюса $b_д$ принимают по рис. 17-15, а высоты воздушного зазора $\delta_д$ между якорем и наконечником добавочного полюса — по рис. 17-16. При расчете коммутации (§ 17-12) эти параметры уточняют.

Рекомендуются следующие числа добавочных полюсов $2p_д$ в зависимости от чисел главных полюсов $2p$: $2p_д = 1$ при $2p = 2$ и $2p_д = 4$ при $2p = 4$.

Минимальная конструктивная длина станины l_1 должна быть такой, чтобы станина перекрывала лобовые части катушек главных и добавочных полюсов, а также соединения компенсационной обмотки. Влияет на длину станины выбранная форма подшипниковых щитов (глубокие или мелкие). Расчетное значение l_1 в зависимости от числа полюсов двигателя:

$2p$	2	4
l_1, мм	$l_2+0,5\tau$	$l_2+0,65\tau$

Высота станины, мм,

$$h_{c1}=\frac{\sigma\Phi_{\text{преда}}}{2k_c l_1 B_{c1}}10^6, \tag{17-11}$$

где k_0 при массивной станине равен 1,0.

Значения h_{c1} в двигателях современных серий приведены для общей ориентации на рис. 17-17.

Для обеспечения удовлетворительной коммутации целесообразно принимать следующие значения магнитной индукции B_{c1}:

Исполнение двигателей по степени защиты, способ охлаждения	Магнитная индукция B_{c1}, Т, при		
	массивной станине и питании двигателя от тиристорного преобразователя с коэффициентом пульсации напряжения не более 1,1 или от генератора постоянного тока	массивной станине и питании двигателя от тиристорного преобразователя с коэффициентом пульсации напряжения более 1,1	шихтованной станине
IP22, IC01 и IC17	1,3	1,1	1,5
IP44, IC37	1,3	1,1	1,5
IP44, IC0141	1,1	1,05	—
IP44, IC0041	1,05	1,0	—

После определения h_{c1} проверяют значение магнитной индукции $B_{с.п}$ в месте входа магнитного потока из станины в главный полюс, Т:

$$B_{с.п}=\frac{\sigma\Phi_{\text{преди}}}{2\,(l_п+b_п)\,h_{c1}}10^6. \tag{17-12}$$

Значение $B_{с.п}$ не должно превышать 1,7Т, в противном случае увеличивают высоту станины h_{c1}.

Внутренний диаметр станины, мм,

$$D_1=D_{н2}+2h_п+4\delta, \tag{17-13}$$

значение 4δ в этом выражении учитывает, помимо двух зазоров, наличие стальных прокладок между главным полюсом и станиной, предназначенных для регулирования воздушного зазора.

Наружный диаметр, мм,

массивной станины

$$D_{н1}=D_1+2h_{c1}, \tag{17-14}$$

восьмигранной шихтованной станины, равный ее высоте,

$$D_{н1}=D_1+2h_{c1}+20. \tag{17-15}$$

Если полученное значение $D_{н1}$ больше $D_{н1макс}$, то следует соответственно уменьшить высоту полюса $h_п$ или же перейти на меньший наружный диаметр якоря $D_{н2}$.

а) Типы и параметры обмоток

Выбор типа обмотки якоря связан с током якоря и с числом главных полюсов, причем все типы проектируемых симметричных обмоток должны удовлетворять общим условиям симметрии:

$$Z_2/a \text{ — целое число;} \quad (17\text{-}16)$$

$$K/a \text{ — целое число;} \quad (17\text{-}17)$$

$$2p/a \text{ — целое число;} \quad (17\text{-}18)$$

где a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Число секций, расположенных по ширине паза, $N_ш=K/Z_2$ также должно быть целым числом; K — число коллекторных пластин.

В сериях двигателей для якорей применяют простую или двухходовую петлевую, простую волновую и лягушечью обмотки. Ниже приведены основные свойства указанных типов обмоток якоря, влияющие на выбор чисел пазов и коллекторных пластин, а также на устройство уравнительных соединений.

А. *Простая петлевая обмотка*[1]

Число параллельных ветвей обмотки $2a=2p$. Число пазов якоря при $2p=2$ принимают четным. Для двигателей с $2p=4$, с целью улучшения коммутации и снижения пульсации магнитного потока, следует стремиться к применению обмоток, у которых

$$Z_2/a \text{ — нечетное число;} \quad (17\text{-}19)$$

$$K/a=K/p \text{ — нечетное число.} \quad (17\text{-}20)$$

Для выполнения условия (17-20) $N_ш$ должно быть нечетным числом, т. е. 3 или 5.

Для выравнивания магнитной ассимметрии машины обмотку снабжают уравнительными соединениями первого рода. При выполнении условий (17-19) и (17-20) уравнительные соединения располагаются с одной стороны якоря. Обычно применяют по одному уравнителю на один или два паза якоря. Площадь поперечного сечения уравнителей равна 20—40% площади поперечного сечения эффективного проводника (меньший процент для большего числа уравнителей). Шаг уравнительных соединений $y_{ур1}=K/p$. Двигатели с $2p=2$ выполняются без уравнительных соединений.

На рис. 17-18 приведена для примера развернутая схема простой петлевой обмотки. С целью упрощения изображения обмотка имеет уменьшенные числа пазов и коллекторных пластин.

Б. *Двухходовая петлевая обмотка*

Число параллельных ветвей сложной петлевой обмотки $2a=2mp$, где m — число ходов обмотки, равное двум; следовательно, при $2p=4$ число параллельных ветвей двухходовой обмотки равно 8.

---

[1] При $2p=2$ применяют только простую петлевую обмотку.

Условия симметрии (17-19) и (17-20) принимают вид:

$$Z_2/p \text{ — четное число;} \qquad (17\text{-}21)$$

$$K/p \text{ — четное число.} \qquad (17\text{-}22)$$

При этом Z_2 и K должны быть четными числами. У симметричных обмоток $N_ш$ может быть равно 2, 3 и 4.

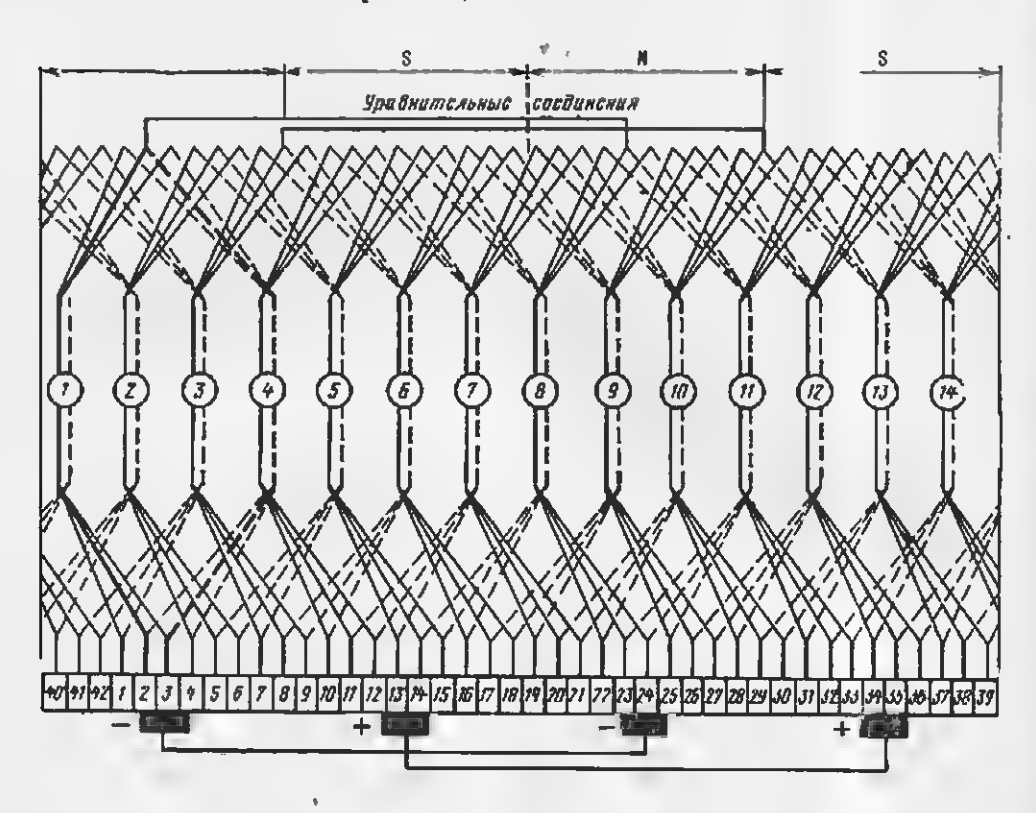


Рис. 17-18. Развернутая схема простой петлевой равносекционной обмотки якоря. $2p=4$; $2a=4$; $Z_2=14$; $K=42$; $N_ш=3$; $u_п=3$; $y_1=9$; $y_2=8$; $y_к=y=1$

Кратность замыкания обмотки равна общему наибольшему делителю числа ходов обмотки m и числа коллекторных пластин K. Так как K — четное число, то при $m=2$ обмотка двукратно замкнутая; один ход обмотки содержит все четные, второй — все нечетные коллекторные пластины.

У таких обмоток применяют уравнители как первого, так и второго рода; последние связывают между собой оба хода обмотки и предназначаются для выравнивания электрической асимметрии. Шаг $y_{ур1} = K/p$ согласно (17-22) будет четным числом; при этом уравнители первого рода включают одни четные или одни нечетные коллекторные пластины, не соединяя электрически между собой оба хода обмотки. Равнопотенциальные точки обоих ходов расположены на различных сторонах якоря и соединяются между собой уравнителями второго рода, проходящими через якорь, что является недостатком симметричных обмоток. Симметричные обмотки ступенчатые.

Применяют также несимметричные обмотки. У этой группы обмоток

$$Z_2/p \text{ — нечетное число;} \quad (17\text{-}23)$$

$$K/p \text{ — нечетное число.} \quad (17\text{-}24)$$

У несимметричных обмоток $N_{\text{п}}$ должно быть нечетным числом (3 или 5); $y_{\text{ур1}}$ в соответствии с (17-24) — также нечетным числом. Уравнители первого рода располагают с одной стороны якоря и подключают к пластинам, принадлежащим различным ходам обмотки; они соединяют электрически оба хода обмотки и выполняют, таким образом, одновременно роль уравнителей второго рода, что является достоинством несимметричной обмотки.

Применение несимметричных обмоток допустимо при числе пазов на полюс $Z_2/2p \geqslant 13{,}5$, т. е. при $2p=4$ число пазов Z_2 должно быть не менее 54 для того, чтобы разность потенциалов между ходами обмотки не была значительной.

Число уравнителей первого рода двухходовых обмоток зависит от условий коммутации и должно быть не менее одного на 2—3 коллекторные пластины. При реактивной э. д. с. коммутируемой секции $e_{\text{р}} > 6$В уравнительными соединениями снабжают все коллекторные пластины.

В. Простая волновая обмотка

Число параллельных ветвей обмотки $2a=2$. Обмотку, как правило, выполняют симметричной, что осуществимо, если $N_{\text{п}}$ не имеет общего делителя с p. Например, при $p=2$ значение $N_{\text{п}}$ может быть равно 3 или 5, но не 2 или 4. Для улучшения коммутации и уменьшения пульсации магнитного потока $Z_2/2p$ должно равняться дробному числу

$$Z_2/2p=N+b/c, \quad (17\text{-}25)$$

где N — любое целое число; c — знаменатель дроби, на который $2p$ должно делиться без остатка, но не быть после сокращения дроби равным двум; b — числитель дроби в пределах от 1 до $(c-1)$. Отсюда следует, что у четырехполюсных двигателей необходимо применять $Z_2/2p$ равным $N+1/4$ или $N+3/4$, а Z_2/p — целое число $+0{,}5$.

Простая волновая обмотка не требует уравнительных соединений.

У двигателей с высотами оси вращения $h \leqslant 315$ мм применяют равносекционную обмотку. Для улучшения коммутации двигателей с $h \geqslant 355$ мм, работающих в более тяжелых условиях, волновую обмотку выполняют ступенчатой.

На рис. 17-19 приведена для примера развернутая схема простой равносекционной волновой обмотки. Для упрощения изображения обмотка имеет уменьшенные числа пазов и коллекторных пластин.

Для унификации штампов в некоторых случаях применяют несимметричную обмотку с «мертвыми» секциями, не присоединяемыми к коллектору. Такое исполнение с одной «мертвой» секцией в двигателях мощностью до 100 кВт и при $K>100$ не ухудшает коммутации.

Г. Лягушечья обмотка

Петлевая и волновая обмотки, составляющие лягушечью обмотку, имеют одинаковое число параллельных ветвей. Каждая из обмоток четырехполюсных двигателей имеет число параллельных ветвей $2a=$

$=2pm$, где m — число ходов петлевой обмотки; при простой петлевой обмотке $2a=4$, при двухходовой $2a=8$. Число пазов выбирают из условий, изложенных выше для петлевых обмоток.

Проводники обеих обмоток имеют одинаковую площадь поперечного сечения и располагаются в четыре слоя по высоте паза; средние по высоте проводники принадлежат петлевой, крайние — волновой обмотке. К пластинам коллектора присоединяют четыре эффективных проводника — по два от каждой обмотки.

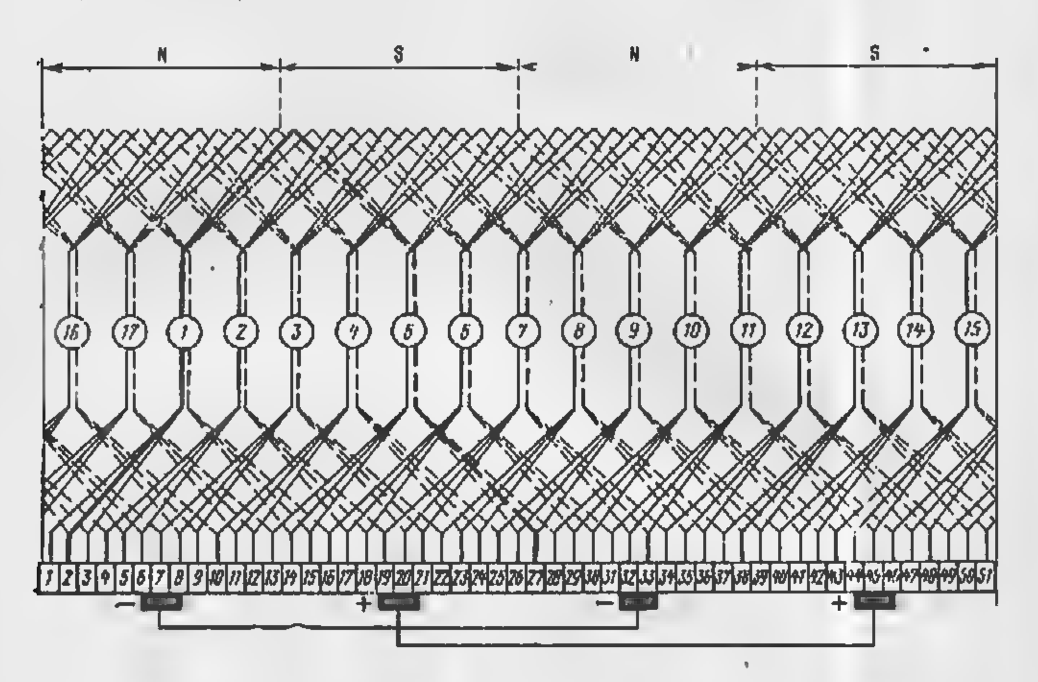


Рис. 17-19. Развернутая схема простой волновой равносекционной обмотки якоря. $2p=4$, $2a=2$; $Z_э=17$; $K=51$; $N_ш=3$; $y_п=4$; $y_1=12$; $y_к=y=25$; $y_2=13$.

Для обмотки, кроме того, должны выполняться следующие условия:

$$y_{к.п}+y_{к.в}=K/p; \tag{17-26}$$

$$y_{1п}+y_{1в}=K/p; \tag{17-27}$$

$$y_{2п}=y_{2в}, \tag{17-28}$$

индексом «п» обозначают параметры петлевой, а индексом «в» — волновой обмотки, составляющих лягушечью обмотку.

Лягушечья обмотка не требует уравнительных соединений, так как секция волновой обмотки по отношению к петлевой является уравнительным соединением первого рода, а секция петлевой обмотки по отношению к волновой — уравнительным соединением второго рода.

Петлевая обмотка, входящая в лягушечью обмотку, должна допускать устройство уравнительных соединений с одной стороны, а следовательно, подчиняться при $2a=4$ условиям (17-19) и (17-20), при $2a=8$ — условиям (17-23) и (17-24).

Таблица 17-9

Сводные данные для расчета параметров обмоток якоря

Тип обмотки		$2p$	$2a$	$Z_э$	K	$Z_э/p$	K/p	$N_ш$	$y_п$	$y = y_к$	y_1	y_2	$y_{ур1}$	$y_{ур2}$
Простая петлевая равносекционная		2	2	Четное	Четное	Четное	Четное или нечетное	2; 3; 4; 5	$\frac{Z_э}{2} - 1$	± 1	$N_ш y_п$	$y_1 - y$	—	—
		4	4	4+2	Четное	Нечетное	Нечетное	3; 5	$\frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon =$ = целое	± 1	$N_ш y_п$	$y_1 - y$	$\frac{K}{p}$	—
Двухходовая петлевая равносекционная несимметричная		4	8	Четное	Четное	Нечетное	Нечетное	3; 5	$\frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon =$ = целое	± 2	$N_ш y_п$	$y_1 - y$	$\frac{K}{p}$	—
Двухходовая петлевая ступенчатая симметричная		4	8	Четное	Четное	Четное	Четное	2; 3; 4	Ступенчатый	± 2	$\frac{K}{2p} \pm 1$	$\frac{K}{2p} \pm 1$	$\frac{K}{p}$	$\frac{K}{p}$
Простая волновая равносекционная		4	2	Нечетное	Нечетное	Целое +0,5	Целое +0,5	3; 5	$\frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon =$ = целое	$\frac{K \mp 1}{p}$	$N_ш y_п$	$y - y_1$	—	—
Простая волновая ступенчатая		4	2	Нечетное	Нечетное	Целое +0,5	Целое +0,5	3; 5	Ступенчатый	$\frac{K \mp 1}{p}$	$\frac{K}{2p} \mp \varepsilon =$ = целое	$y - y_1$	—	—
Лягушечья равносекционная разрезная	петлевая	4	$4m$	Четное	Четное	Нечетное	Нечетное	3; 5	$\frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon =$ = целое	$\pm m$	$N_ш y_п$	$y_{1п} \mp m$	—	—
	волновая		— $4m$						$\frac{Z_э}{p} - y_{п\,п}$	$\frac{K}{p} \mp m$	$\frac{K}{p} - y_{1п}$	$y_{1в} \mp m$	—	—

Примечания: 1. y_1 и y_2 — первый и второй частичные шаги по элементарным пазам; y — результирующий шаг по элементарным пазам; $y_к$ — шаг по коллектору; $y_п$ — шаг по реальным пазам; $y_{ур1}$ и $y_{ур2}$ — шаги уравнительных соединений первого и второго рода соответственно; ε — укорочение шага обмотки.

2. В выражении для y_1 и y_2 двухходовой петлевой ступенчатой симметричной обмотки знаки перед единицей должны быть разными.

3. С целью унификации в серии двигателей чисел и размеров пазов, размеров обмоточных проводов и коллекторных пластин, допускается в необходимых случаях применение $N_ш = 2$ или 4 для простых петлевых, простых волновых и лягушечьих обмоток якоря.

Волновую обмотку выполняют многоходовой однократно замкнутой. На рис. 17-20 приведена для примера схема лягушечьей обмотки.

Более удобной для производства и для ремонта является разрезная равносекционная лягушечья обмотка (рис. 17-21). Для улучшения коммутации разрезная обмотка может быть выполнена ступенчатой. Недостатком разрезной обмотки является необходимость дополнительных паек со стороны противоположной коллектору.

Можно также применять неразрезную обмотку, т. е. без дополнительных паек, однако из-за большого объема корпусной изоляции коэффициент заполнения медью пазов при такой обмотке значительно снижается.

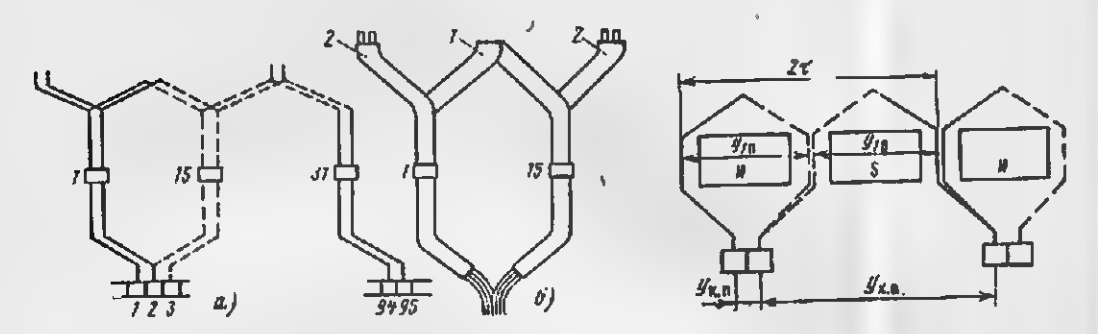


Рис. 17-20. Лягушечья обмотка якоря.

а — схема, $2p=4$, $2a=4$; $K=166$; $Z=83$, $S_ш=3$, $y_{п.п}=15$, $y_{1п}=45$, $y_{к.п}=1$, $y_{2п}=y_{2в}=44$, $y_{п.в}=16$; $y_{1в}=46$, $y_{к.в}=82$; б — форма катушки. 1 — петлевой обмотки; 2 — волновой обмотки.

Рис. 17-21. Элемент разрезной равносекционной лягушечьей обмотки якоря.

В целях удобства расчета лягушечьей обмотки, целесообразно рассматривать ее как петлевую с двумя параллельными проводами по высоте паза; при этом условия выполнимости, расчет шагов и конструкция изоляции должны соответствовать лягушечьей обмотке.

Расчетные формулы для определения числа параллельных ветвей, чисел пазов и секций, расположенных по ширине паза, а также шагов обмоток и уравнительных соединений рассмотренных выше типов обмоток приведены в табл. 17-9.

б) Число витков обмотки якоря и число коллекторных пластин

Выбор типа и параметров обмотки производят в следующем порядке.

Предварительное значение тока якоря, А,

$$I_2 = k_i P_1 / U, \qquad (17\text{-}29)$$

где $k_i = I_2/I = 1 - I_ш/I$; средние значения $I_ш/I = f(P_1)$ при изоляции класса нагревостойкости B (для двигателей с $h = 80 \div 200$ мм) и F (для двигателей с $h = 225 \div 500$ мм), используемой по нагреву, приведены на рис. 17-22. Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения $I_ш/I$, приведенные на рис. 17-22, умножаются на поправочные коэффициенты из табл. 17-7.

Тип обмотки принимают из данных табл. 17-10 исходя из принятого числа главных полюсов и тока якори.

У двигателей с $2p=4$ и $I_2<700$ А в отдельных случаях может применяться простая петлевая или лягушечья обмотка, если при простой волновой общее число витков обмотки якоря w_2 или число коллекторных пластин K получаются относительно малыми.

При выборе петлевой или лягушечьей обмотки в быстроходных двигателях ($v_2 \geq 40$ м/с) и в двигателях, работающих с высокими перегрузками ($I_{макс}/I_н>2$), предпочтение отдается лягушечьей обмотке; в тихоходных двигателях и в двигателях, работающих с невысокими перегрузками, целесообразно применение петлевой обмотки.

Таблица 17-10

Рекомендуемые типы обмотки якоря

$2p$	I_1, А	Тип обмотки
2	—	Простая петлевая
4	до 700	Простая волновая
4	Свыше 700 до 1400	Простая петлевая или лягушечья
4	Свыше 1400	Двухходовая петлевая или лягушечья

С целью унификации профилей меди обмотки якоря у двигателей серии с $h \geq 355$ мм в отдельных случаях допускают применение простой петлевой или лягушечьей обмотки ($2a=4$) при токе I_2 до 1600 А.

Предварительное число витков обмотки якоря

$$w_{2предв}=\frac{30k_e U}{(p/a)\,n\Phi_{предв}}, \qquad (17\text{-}30)$$

где $k_e=E/U=1-\Delta U/U$; средние значения $\Delta U/U=f(P_1)$ при изоляции класса нагревостойкости В (для двигателей с $h=80 \div 200$ мм) и F (для двигателей с $h=225 \div 500$ мм), используемой по нагреву, приведены на рис. 17-23.

Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения $\Delta U/U$, приведенные на рис. 17-23, умножаются на поправочные коэффициенты из табл. 17-7.

Для лягушечьей обмотки полученное значение w_2, соответствует числу витков каждой из составляющих обмоток — петлевой и волновой.

Число витков в секции:

$$w_{c2}=k_{c2}w_{2предв}/D_{н2}, \qquad (17\text{-}31)$$

где коэффициент k_{c2} принимают равным:

$D_{н2}$, мм	$\geq 70 \leq 200$	$>200 \leq 600$
k_{c2}	1,8	2,3

У двигателей с полузакрытыми пазами и всыпной обмоткой из проводов круглого поперечного сечения значение w_{c2} может быть целым числом или дробным, так как при указанной обмотке допускают разные числа витков в секциях, расположенных рядом в одном пазу. Например, при трех секциях в пазу ($N_ш=3$) и числе витков в секциях 3—4—3 среднее значение $w_{c2}=3^1/_3$.

У двигателей с открытыми пазами и обмоткой из проводов прямоугольного поперечного сечения значения w_{c2} округляют до ближайшего целого числа.

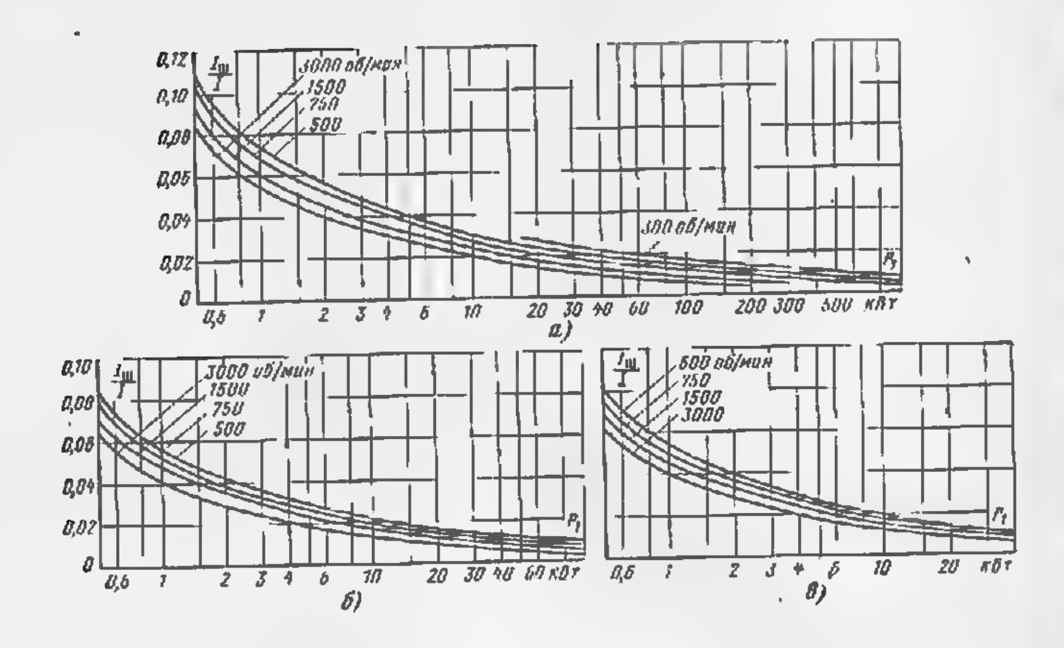


Рис. 17-22. Средние значения $I_ш/I=f(P_1)$ двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22 и способами охлаждения IC01 и IC17; со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37, *б* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141; *в* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0041.

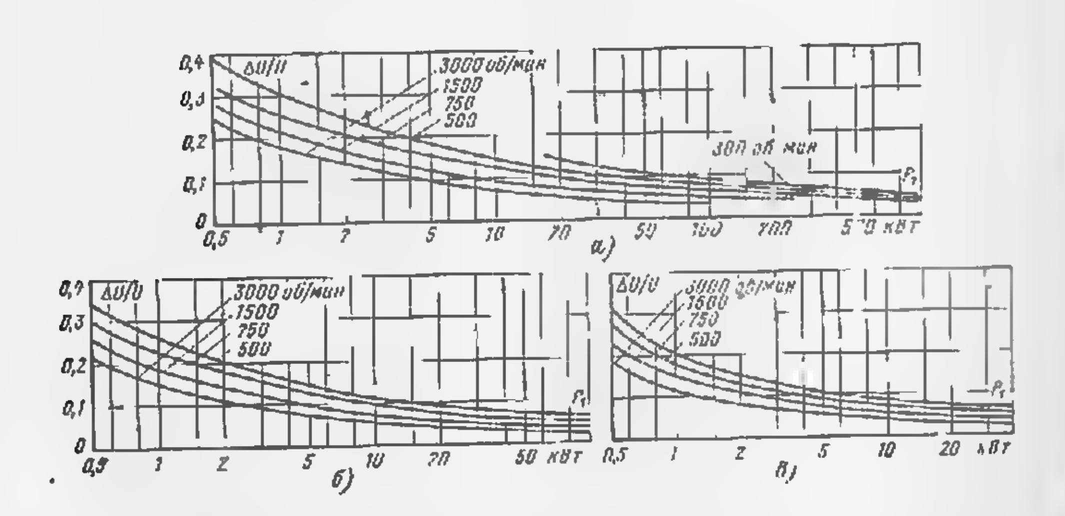


Рис. 17-23. Средние значения $\Delta U/U=f(P_1)$ двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22 и способами охлаждения IC01 и IC17; со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37; *б* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141; *в* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0041.

Число пазов якоря

$$Z_2 = w_{2\text{предв}} / N_{ш} w_{c2}. \qquad (17\text{-}32)$$

Число коллекторных пластин

$$K = N_{ш} Z_2, \qquad (17\text{-}33)$$

причем Z_2/p, K/p, $N_{ш}$ должны удовлетворять условиям табл. 17-9. Кроме того, при выбранном числе пазов зубцовое деление по наружному диаметру якоря, мм,

$$t_2 = \pi D_{н2} / Z_2 \qquad (17\text{-}34)$$

должно находиться в следующих пределах:

h, мм	80—200	225—315	355—500
t_2, мм	10—20	15—35	18—40

Наружный диаметр коллектора зависит от наружного диаметра якоря и конструкции коллектора (с петушками или без петушков). В двигателях с полузакрытыми пазами применяют коллекторы без петушков при $2cd \leqslant 9$ мм (c — число элементарных проводов в эффективном проводнике, d — диаметр голого провода, мм). При такой конструкции коллектора концы проводов якоря закладывают в канавки, выфрезерованные в пластинах коллектора. При бо́льших значениях $2cd$, а также при якорной обмотке с проводами прямоугольного поперечного сечения, применяют коллекторы с петушками.

Наружный диаметр коллектора, мм, при полузакрытых пазах якоря и отсутствии петушков на коллекторе

$$D_к \approx (0{,}75 \div 0{,}8) D_{н2}, \qquad (17\text{-}35)$$

при открытых пазах якоря и наличии петушков на коллекторе

$$D_к \approx (0{,}65 \div 0{,}7) D_{н2}. \qquad (17\text{-}36)$$

Диаметр $D_к$ целесообразно округлить до ближайшего значения из следующего предпочтительного ряда по ГОСТ 19780-74: 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 125; 140; 160; 180; 200; 224; 250; 280, 315; 355; 400; 450; 500; 560 мм.

С целью унификации двигатели с полузакрытыми пазами двух соседних высот оси вращения могут иметь коллекторы одинакового диаметра в результате чего возможны отклонения от условия (17-35).

Окружная скорость коллектора, м/с,

$$v_к = \pi D_к n / 60\,000. \qquad (17\text{-}37)$$

При максимальной рабочей частоте вращения значение $v_к$ не должно превышать 40 м/с.

Коллекторное деление, мм,

$$t_к = \pi D_к / K. \qquad (17\text{-}38)$$

Толщина коллекторной пластины, определяемая коллекторным делением, должна быть такова, что после фрезерования канавок в коллекторных пластинах для присоединения концов проводников обмотки якоря или для впаивания петушков стенки по бокам канавок не должны быть слишком тонкими. Кроме того, тонкие коллекторные пластины затрудняют осуществление монолитности коллектора и увеличивают трудоемкость его изготовления.

Минимальные допустимые значения коллекторного деления составляют:

$D_к$, мм	56—125	140—280	315—500
$t_{к.мин}$, мм	3,0	3,5	3,8

При расчетном значении $t_к < t_{к\,мин}$ уменьшают число коллекторных пластин, увеличивая w_{c2} у двигателей с $h=800\div250$ мм и уменьшая $2a$ у двигателей с $h=280\div500$ мм.

Максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами при нагрузке, В,

$$U_{к\,макс}=2pUk_н/a'K, \qquad (17\text{-}39)$$

где $k_н$ коэффициент искажения поля, равный отношению максимальной индукции под главным полюсом при нагрузке к максимальной индукции при холостом ходе.

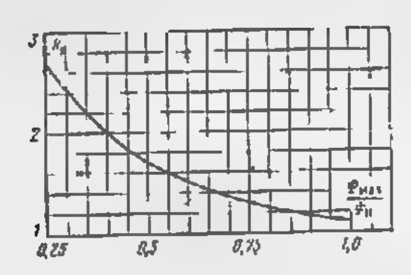


Рис. 17-24. Средние значения коэффициента $k_н=f(Ф_{макс}/Ф_н)$ для некомпенсированных двигателей с эксцентричным воздушным зазором $\delta''/\delta'=2,5\div3,0$.

Это отношение зависит от размеров и формы воздушного зазора под главным полюсом, наличия компенсационной обмотки и степени компенсации, от диапазона регулирования поля главных полюсов. Для двигателей с компенсационной обмоткой и степенью компенсации в пределах 0,85—1,15 значение $k_н=1$. Значения $k_н=f(Ф_{мин}/Ф_н)$ двигателей без компенсационной обмотки приведены на рис. 17-24; $Ф_н$ — магнитный поток при номинальной, а $Ф_{мин}$ — при максимальной частоте вращения; $Ф_{мин}/Ф_н \approx n_н/n_{макс}$.

Для избежания искрения потенциального характера $U_{к\,макс}$ не должно превышать значений, указанных в табл. 17-11 при условии, что

Таблица 17-11

Максимальные допустимые значения $U_{к.макс}$

Высота оси вращения h, мм	Число главных полюсов $2p$	$U_{к.макс}$, В
80—110	2	100
112—200	4	50
225—315	4	30
355—500	4	25

изоляция между коллекторными пластинами продорожена, края пластин не имеют острых кромок, толщина изоляционных прокладок между пластинами у двигателей с $h=80\div315$ равна 0,8 мм, а у двигателей с $h=355\div500$ мм равна 1 мм.

Уточненное число витков обмотки якоря

$$w_2=w_{c2}K. \qquad (17\text{-}40а)$$

Для лягушечьей обмотки w_2 равно числу витков одной из составляющих обмоток.

Число эффективных проводников в пазу

$$N_{п2}=2N_{ш}w_{c2}. \qquad (17\text{-}40б)$$

Ток в пазу, А,

$$\Sigma I_{п2}=N_{п2}I_2/2a. \qquad (17\text{-}41)$$

Значение $\Sigma I_{п2}$ не должно превосходить 1500 А.

Уточненная расчетная длина сердечника якоря

$$l'_2=l'_{2предв}w_{2предв}/w_2, \qquad (17\text{-}42)$$

где w_2 — уточненное число витков обмотки якоря (17-40а).

После этого корректируют l_2, а также $l_п$, $l_{в.д}$ и l_1, предварительно установленные в § 17-2.

Линейная нагрузка якоря, А/см,

$$A_2=20w_2I_2/\pi D_{н2}2a. \qquad (17\text{-}43)$$

Средний уровень линейных нагрузок в двигателях современных серий приведен для общей ориентации на рис. 17-25 при изоляции классов нагревостойкости В (для двигателей с h=80÷200 мм) и F (для двигателей с h=225÷500 мм), используемой по нагреву. Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения A_2, приведенные на рис. 17-25, умножаются на поправочные коэффициенты (табл. 17-7).

в) Размеры овальных полузакрытых пазов и круглых проводников обмотки

Форма и размеры овального полузакрытого паза показаны на рис. 17-26.

Предварительная ширина зубца с равновеликим сечением, мм,

$$b_{з2}=t_2B_\delta/k_cB_{з2}. \qquad (17\text{-}44)$$

Магнитная индукция $B_{з2}$ может быть предварительно принята по табл. 17-12.

Таблица 17-12

Средние значения магнитной индукции в зубцах якорей с овальными полузакрытыми пазами

Исполнение двигателей по степени защиты, способ охлаждения	Магнитная индукция $B_{з2}$, Т, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22, IC01 и IC17	1,65—1,85	1,75—1,95	1,85—2,05	1,9—2,1
IP44, IC37	1,65—1,85	1,75—1,95	1,85—2,05	1,9—2,1
IP44, IC0141	1,4—1,6	1,5—1,7	1,55—1,75	1,6—1,8
IP44, IC0041	1,3—1,5	1,4—1,6	1,5—1,7	1,55—1,75

Примечание. Значения магнитной индукции целесообразно принимать в виде средних арифметических между указанными в таблице наименьшим и наибольшим значениями или несколько выше средних. При дальнейших расчетах предельные значения таблицы могут быть превышены, но не более чем на 5%.

Размеры и площади поперечного сечения пазов:

большой радиус, мм,

$$r_1=\frac{\pi(D_{н2}-2h_{ш})-Z_2b_{з2}}{2(Z_2+\pi)}. \qquad (17\text{-}45)$$

Высоту шлица паза $h_{ш}$ принимают равной 0,8 мм.

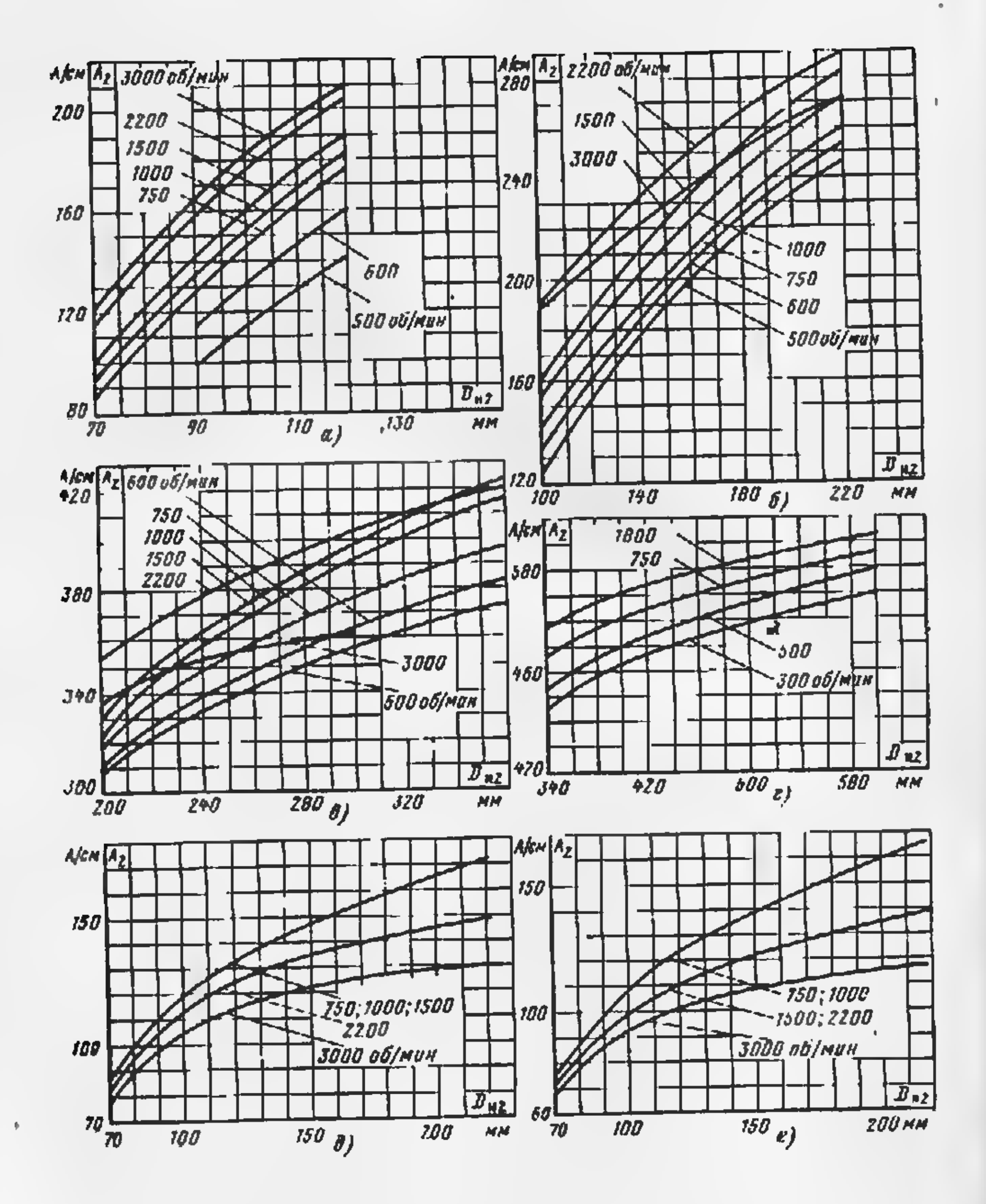


Рис. 17-25. Средние значения $A_2=f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока.

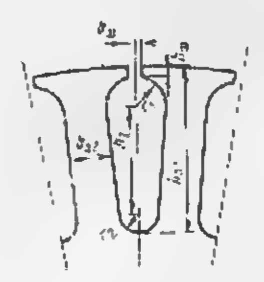
а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, $D_{н2}=70\div120$ мм; $2p=2$; б — то же, $D_{п2}=100\div220$ мм; $2p=4$; в — то же, $D_{п2}=200\div360$ мм; $2p=4$; г — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17, со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37; $D_{н2}=340\div600$ мм; $2p=4$; д — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, $D_{п2}=70\div220$ мм, е — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0041, $D_{п2}=70\div220$ мм.

Высоту полузакрытого паза $h_{п2}$ принимают предварительно из рис. 17-27 и определяют при этом магнитную индукцию в спинке якоря, Т:

$$B_{c2}=\frac{\Phi_{\text{предв}}\cdot 10^6}{2l_{\text{эф2}}(h_{c2}-2/3l_{к2})},\qquad (17\text{-}46)$$

где $l_{эф2}=k_c l_2$; h_{c2} — высота спинки якоря, мм; $h_{c2}=(D_{н2}-D_2)/2-h_{п2}$; величину $2/3d_{к2}$ подставляют в (17-46) при проектировании двигателей с одним или двумя рядами аксиальных каналов в сердечнике якоря.

Полученное значение B_{c2} сопоставляют со значениями, приведенными в табл. 17-13.



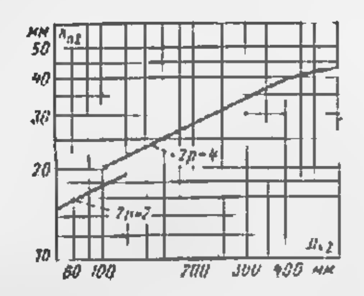


Рис. 17-26. Форма и размеры полузакрытого овального паза якоря.

Рис. 17-27. Средние значения $h_{п2}=f(D_{н2})$.

Если магнитная индукция B_{c2} превышает допускаемые значения, то следует соответственно уменьшить $h_{п2}$.

Меньший радиус, мм,

$$r_2=\frac{\pi(D_{н2}-2h_{п2})-Z_2 b_{z2}}{2(Z_2-\pi)}.\qquad (17\text{-}47)$$

Расстояние между центрами радиусов, мм,

$$h_1=h_{п2}-h_{ш}-r_1-r_2.\qquad (17\text{-}48)$$

Площадь поперечного сечения паза в штампе, мм²,

$$Q_{п2}=\frac{\pi}{2}(r_1^2+r_2^2)+(r_1+r_2)h_1.\qquad (17\text{-}49)$$

Таблица 17-13

Предельные допускаемые значения магнитной индукции в спинке якоря

Число полюсов $2p$	Магнитная индукция B_{c2}, Т, для двигателей со степенью защиты и способом охлаждения					
	IP23 и IC01, IP22 и IC17, IP44 и IC37		IP44, IC0141		IP44, IC0341	
	при частоте перемагничивания $f=pn/60$, Гц					
	50—100	<50	50—100	<50	50—100	<50
2	1,6	1,7	1,35	1,4	1,25	1,3
4	1,4	1,45	1,15	1,2	1,05	1,1

Примечание. При проектировании двигателей, питающихся от тиристорных преобразователей с коэффициентом пульсаций напряжения более 1,1 предельные значения B_{c2} следует уменьшить примерно на 15%

Площадь поперечного сечения паза в свету, мм²,

$$Q'_{п2}=\frac{\pi}{2}\left[\left(r_1-\frac{b_c}{2}\right)^2+\left(r_2-\frac{b_c}{2}\right)^2\right]+(r_1+r_2-b_c)h_1, \qquad (17\text{-}50)$$

где b_c — припуск на сборку сердечника по ширине паза (см. табл. 17-1).

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой, мм²,

$$Q''_{п2}=Q'_{п2}-Q_и-Q_{кл}-Q_{пр}. \qquad (17\text{-}51)$$

Здесь $Q_и$ — площадь поперечного сечения корпусной изоляции, мм²,

$$Q_и\approx b_и(2\pi r_1+\pi r_2+2h_1),$$

где $b_и$ — односторонняя толщина корпусной изоляции — по табл. 17-14; конструкция изоляции — по табл. 9-11; $Q_{кл}$ — площадь поперечного сечения клина или пазовой крышки, мм²; $Q_{пр}$ — площадь поперечного сечения прокладки между верхней и нижней катушками в пазу, мм².

При креплении обмотки в пазу клином

$$Q_{кл}+Q_{пр}\approx 5r_1;$$

Таблица 17-14

Значения $b_и$ двигателей постоянного тока с полузакрытыми пазами якоря

h, мм	$b_и$, мм
80—112	0,35
132—200	0,5

при креплении обмотки пазовой крышкой

$$Q_{кл}+Q_{пр}\approx 3r_1.$$

Проводники круглого поперечного сечения располагаются в полузакрытых пазах якоря беспорядочно. При этом диаметр провода должен быть таким, чтобы коэффициент заполнения паза изолированными проводами $k_п$ был равен 0,7—0,75:

$$k_п=N_{п2}d'^2_1/Q''_{п2}. \qquad (17\text{-}52)$$

Для обмоток якорей с полузакрытыми пазами рекомендуется применять провода круглого поперечного сечения марки ПЭТВ при классе нагревостойкости B и ПЭТ-155 при классе нагревостойкости F (см. § 7-2).

Двигатели с изоляцией класса нагревостойкости H следует проектировать с обмоткой якоря из проводов с эмалевой изоляцией на базе полиимидного лака, выпуск которых должен быть освоен отечественной промышленностью; двусторонняя толщина изоляции у этих проводов такая же, как у проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155. Могут быть также применены провода марки ПСДКТ, но это несколько ухудшит заполнение пазов медью и приведет к снижению уровня использования активной части двигателей.

Допустимый диаметр изолированного провода, мм, по (17-52)

$$d'=\sqrt{k_п Q''_{п2}/N_{п2}}.$$

По приложению 30 следует найти ближайший необходимый диаметр d' и соответствующее ему значение диаметра d, а затем уточнить коэффициент заполнения паза по (17-52).

Для повышения надежности всыпной обмотки и облегчения ее укладки диаметр d' не должен превышать 1,71 мм для марок ПЭТВ и ПЭТ-155, а также эмалированных проводов на базе полиимидного лака и 1,9 мм для марки ПСДКТ. При больших значениях d' эффективные проводники подразделяют на элементарные, после чего уточняют коэффициент заполнения паза:

$$k_п = cN_{п2}d'^2/Q''_{п2}, \qquad (17\text{-}53)$$

где c — число элементарных проводников в эффективном проводнике.

Если $k_п$ больше 0,75, то соответственно уменьшают диаметр провода или корректируют размеры паза.

Края корпусной изоляции паза для облегчения укладки проводников при намотке якоря выпускают наружу через шлиц. При одном и том же штампе, т. е. при неизменном числе пазов и неизменных их размерах, могут применяться обмотки с различными числами и диаметрами проводников (для различных порядковых длин сердечника, различных номинальных напряжений, ряда модификации и т. д.), поэтому ширину шлица $b_ш$ принимают несколько больше суммы двусторонней толщины корпусной изоляции и максимального диаметра изолированных проводников, которые могут быть применены для данного паза.

Плотность тока в обмотке якоря, А/мм²,

$$J_2 = I_2/2acq. \qquad (17\text{-}54)$$

Характеристикой тепловой нагрузки якоря является произведение A_2J_2, А²/(см·мм²). У проектируемого двигателя определяют указанное произведение и сравнивают его со средними допускаемыми значениями, приведенными на рис. 17-28, при изоляции класса нагревостойкости В, используемой по нагреву. Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения A_2J_2, приведенные на рис. 17-28, умножаются на поправочные коэффициенты (табл. 17-7).

Если полученное из расчета значение A_2J_2 превышает допускаемое более чем на 10%, выбирают проводник большего диаметра с учетом соответствующего уменьшения плотности тока J_2. Для размещения проводников в пазу с допускаемым коэффициентом заполнения изменяют пространство паза, занимаемое обмоткой, одновременно увеличивая $h_{п2}$ и уменьшая $b_{з2}$ на один и тот же процент. При этом производится проверка магнитных индукций $B_{с2}$ и $B_{з2}$, которые не должны превосходить допускаемых значений с учетом рекомендаций к табл. 17-12. В некоторых случаях произведение A_2J_2 приходится уменьшать переходом на меньшее число проводников в пазу $N_{п2}$ с увеличением площади их поперечного сечения, увеличением длины сердечника l_2 и магнитного потока $\Phi_{предв}$.

Средняя ширина секции обмотки, мм,

$$b_{ср} = t_{ср}y_п, \qquad (17\text{-}55)$$

где $t_{ср}$ — среднее зубцовое деление якоря, мм:

$$t_{ср} = \pi(D_{н2} - h_{п2})/Z_2.$$

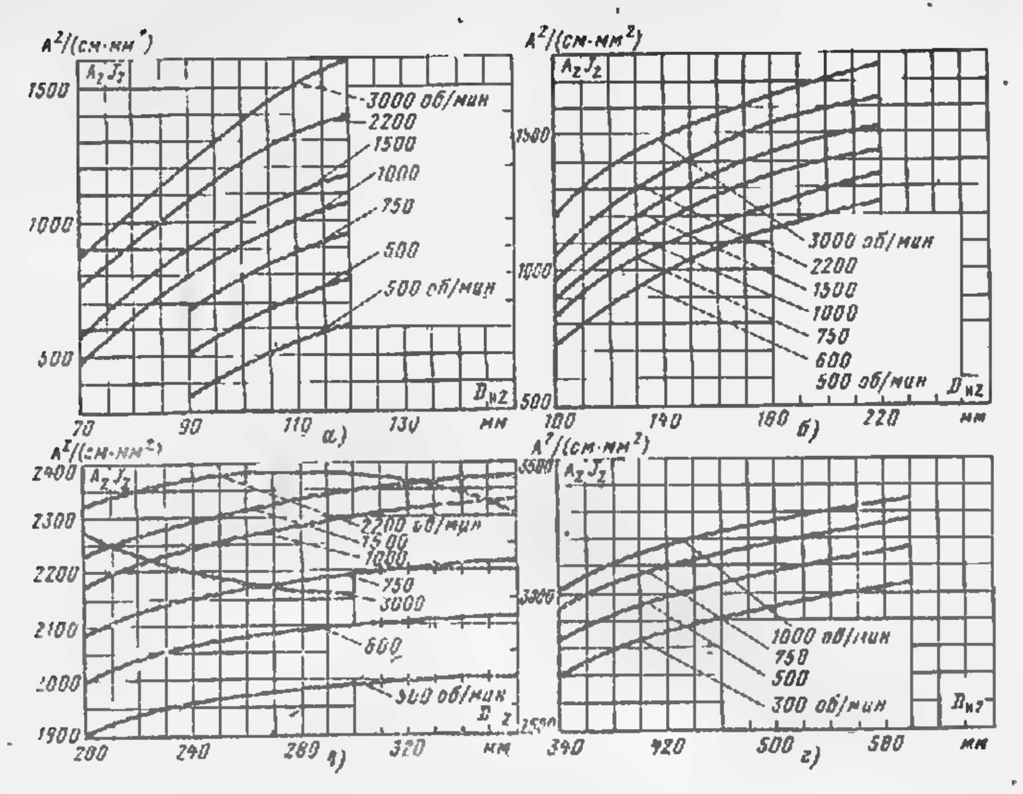


Рис. 17-28. Средние значения $A_2 J_2 = f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, $D_{н2} = 70 \div 120$ мм; $2p = 2$; *б* — то же, $D_{н2} = 100 \div 220$ мм, $2p = 4$, *в* — то же, $D_{н2} = 200 \div 360$ мм; $2p = 4$; *г* — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17, со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37; $D_{н2} = 340 \div 600$ мм; $2p = 4$;

Средняя длина одной лобовой части секции обмотки, мм,

$$l_{л2} = (0{,}7 + 0{,}4p)\, b_{ср} + 15. \qquad (17\text{-}56)$$

Средняя длина витка обмотки, мм,

$$l_{ср2} = 2\,(l_2 + l_{л2}). \qquad (17\text{-}57)$$

Сопротивление обмотки, Ом,

$$r_2 = \frac{w_2 l_{ср2}}{\gamma_\theta\, (2a)^2\, cq \cdot 10^3}. \qquad (17\text{-}58)$$

где γ_θ — удельная проводимость меди при расчетной рабочей температуре (см. табл. 14-29).

О приведении сопротивления обмотки к расчетной рабочей температуре см. § 14-6.

Вылет лобовой части обмотки, мм,

$$l_{в2} = (0{,}12 + 0{,}14p)\, b_{ср} + 7{,}5. \qquad (17\text{-}59)$$

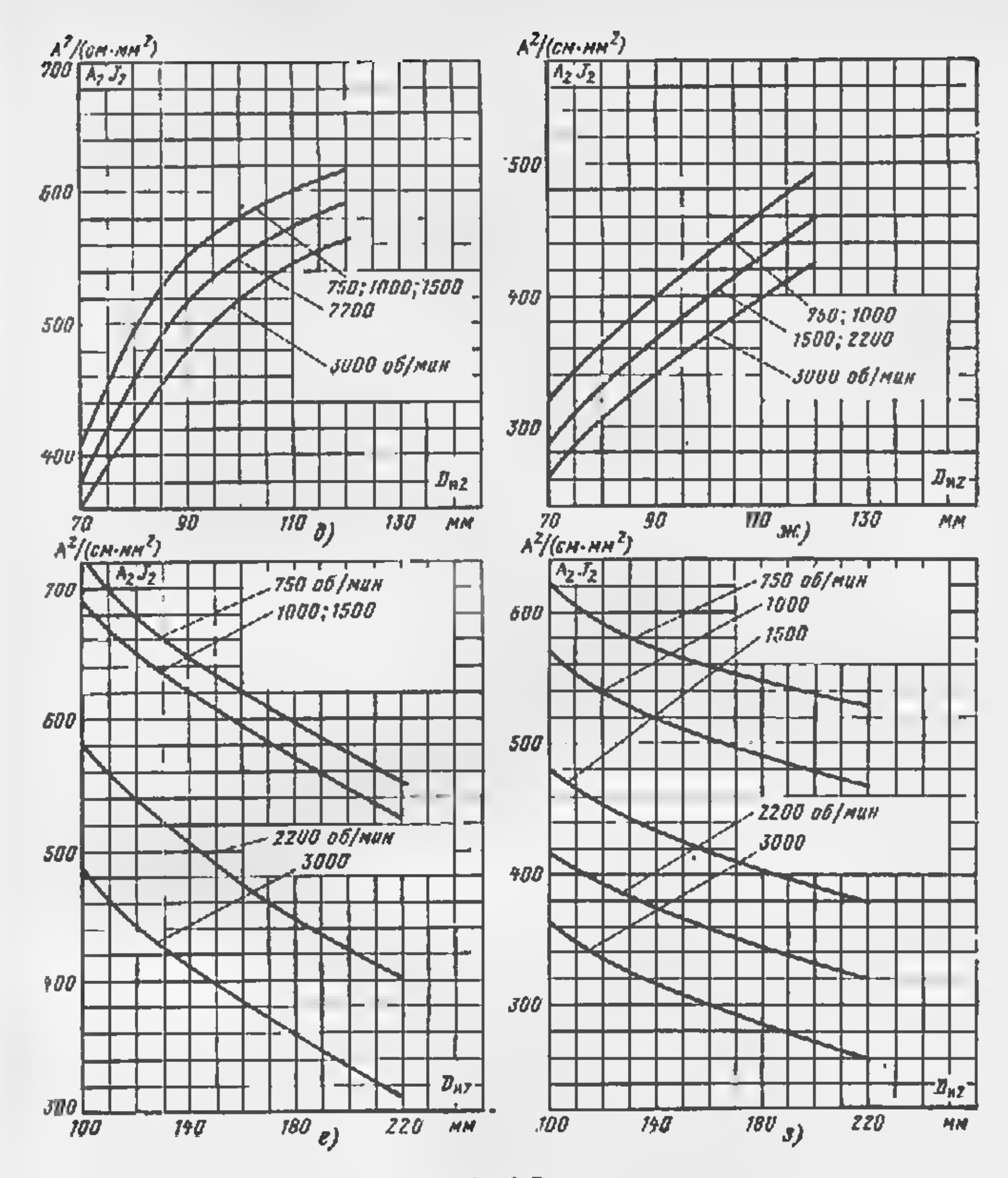


Рис. 17-28. Средние значения $A_2J_2 = f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока.

д — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141; закрытого исполнения (IP44) с наружным обдувом $D_{н2} = 70 \div 120$ мм, $2p = 2$. *е* — то же, $D_{н2} = 100 \div 220$ мм, $2p = 4$; *ж* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0041, $D_{н2} = 70 \div 120$ мм, $2p = 2$; *з* — то же, $D_{н2} = 100 \div 220$ мм; $2p = 4$.

г) Размеры прямоугольных открытых пазов и прямоугольных проводников обмотки

Форма и размеры открытого прямоугольного паза показаны на рис. 17-29. Предварительная ширина зубца в наиболее узком месте, мм,

$$b_{z2\text{мин}} = t_2 B_{\delta i} / B_{z2\text{макс}} k_c. \tag{17-60}$$

Магнитная индукция в расчетном наименьшем сечении зубца $B_{з2макс}$ может быть предварительно принята по табл. 17-15.

При выборе значений $B_{з2макс}$ следует учитывать примечание к табл. 17-12.

Высоту открытого паза $h_{п2}$ предварительно принимают по рис. 17-27 и проверяют при этом значение магнитной индукции в спинке якоря, Т:

$$B_{c2} = \frac{\Phi_{прев} 10^6}{2 l_{эф2} (h_{c2} - 2/3 d_{к2})}, \quad (17\text{-}61)$$

где высота спинки якоря, мм,

$$h_{c2} = (D_{н2} - D_2)/2 - h_{п2}.$$

Если полученная магнитная индукция B_{c2} превышает допустимые значения, приведенные в табл. 17-13, то следует соответственно уменьшить $h_{п2}$.

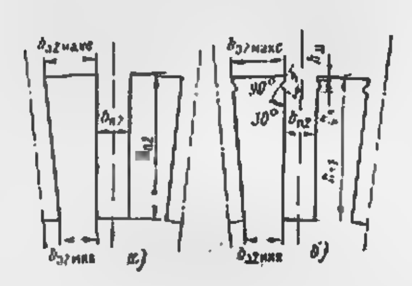


Рис. 17-29. Форма и размеры открытого прямоугольного паза якоря.

а — с креплением обмотки бандажами; *б* — с креплением обмотки клиньями

Ширина паза в штампе, мм,

$$b_{п2} = \pi (D_{н2} - 2h_{п2})/Z_2 - b_{з2мин}. \quad (17\text{-}62)$$

При проводниках прямоугольного поперечного сечения размеры открытых пазов соответствуют сумме размеров проводников, изоляции, а также припусков на сборку сердечника и укладку обмотки по высоте и по ширине паза.

Допустимая высота проводника с витковой изоляцией мм,

$$h' = (h_{п2} - h_и - h_б - h_c)/N_в. \quad (17\text{-}63)$$

Допустимая ширина проводника с витковой изоляцией, мм,

$$b' = (b_{п2} - b_и - b_c - b_{ск})/N_{ш}. \quad (17\text{-}64)$$

Таблица 17-15

Средние значения магнитной индукции $B_{з2макс}$ в зубцах якорей с прямоугольными открытыми пазами

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция $B_{з2макс}$, Т, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	≤25
IP22, IC01 и IC17	1,9—2,1	2,0—2,2	2,1—2,3	2,2—2,4
IP44, IC37	1,9—2,1	2,0—2,2	2,1—2,3	2,2—2,4
IP44, IC0141	1,6—1,8	1,7—1,9	1,8—2,0	1,9—2,1
IP44, IC0041	1,5—1,7	1,6—1,8	1,7—1,9	1,8—2,0

Здесь $h_и$ и $b_и$ — общая толщина изоляции в пазу якоря по его высоте и ширине, указанная в табл. 17-16 с учетом допуска на укладку обмотки, но без учета толщины витковой изоляции и высоты бандажной канавки $h_б$ или клина. Для двигателей с h=225÷315 мм целесооб-

разно крепление пазовой части обмотки якоря стеклобандажами; высоту бандажных канавок принимают в зависимости от высоты оси вращения:

h, мм	225	250—380	315
$h_б$, мм	2	3	3,5

Конструкция изоляции приведена в табл. 9-12.

У двигателей с h=355÷500 мм обмотка крепится клиньями, высоту клина $h_к$ принимают равной 4,0 мм, а высоту шлица $h_ш$=1,0 мм; при креплении обмотки клиньями подставляют вместо $h_б$ в (17-63) значение $h_к+h_ш$=5,0 мм; $h_с$ и $b_п$ — припуски на сборку сердечника якоря по высоте и ширине паза по табл. 17-1, $N_в$ и $N_ш$ — числа проводников соответственно по высоте и ширине паза; $N_в$=$2w_{c2}$; $b_{ск}$ — припуск по ширине паза при наличии скоса пазов; при скосе пазов в пределах от 1/2 до 1 зубцового деления $b_{ск}\approx0,1$ мм. При $w_{c2}=1$ и $f=pn/60\geqslant15$ Гц эффективные проводники подразделяют по высоте на два элементарных для уменьшения добавочных потерь на вихревые токи в проводниках обмотки якоря; соответственно $N_в=4$.

Таблица 17-16

Значения $h_п$ и $b_п$ двигателей постоянного тока с открытыми пазами якоря

h, мм	Класс нагревостойкости изоляции	$h_п$, мм, при w_{c2}			$b_п$, мм, при $N_ш$			
		1	2	3	2	3	4	5
225—315	B, F, H	4,8	5,1	5,4	1,7	1,7	1,7	1,7
355—500	B	6,24	6,24	—	2,14	2,14	2,44	2,54
	F, H	5,8	5,8	—	2,1	2,1	2,3	2,3

Для лягушечьей обмотки высота элементарного проводника является высотой эффективного проводника каждой составляющей обмотки. Конструкция изоляции приведена в табл. 9-13, 9-14.

Высота неизолированного провода, мм,

$$h=h'-\Delta_п. \tag{17-65}$$

Ширина неизолированного провода, мм,

$$b=b'-\Delta_п, \tag{17-66}$$

где $\Delta_п$ — двусторонняя толщина изоляции провода.

Размеры проводов по высоте и ширине округляют до ближайших стандартных по приложению 31. Для обмоток якорей двигателей с h=225÷315 мм рекомендуется применение следующих марок проводов прямоугольного поперечного сечения:

Изоляция класса нагревостойкости	Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции $\Delta_п$, мм
B	ПЭТВП	0,15
F	ПЭТП-155	0,15

Двигатели с указанными высотами оси вращения и изоляцией класса нагревостойкости H следует проектировать с обмоткой якоря из прямоугольных проводов с эмалевой изоляцией на базе полиимидного лака,

выпуск которых должен быть освоен отечественной промышленностью. Размеры и толщину изоляции этих проводов можно предварительно принимать такими же, как для проводов марок ПЭТВП и ПЭТП-155. Могут быть также применены провода марки ПСДКТ, при этом несколько снижаются заполнение пазов медью и использование активной части двигателей.

Площадь поперечного сечения прямоугольных проводов стандартных размеров определяют по приложению 31.

Для обмоток якорей двигателей с $h=355 \div 500$ мм и изоляцией классов нагревостойкости B и F применяют провода марки ПСД, дополнительно изолируемые через один виток стеклянной лентой; при изоляции класса нагревостойкости H применяют провода марки ПСДК, дополнительно изолируемые через один виток полиимидной пленкой. Двустороннюю толщину изоляции проводов указанных марок определяют по приложению 32.

После выбора стандартных размеров неизолированного и изолированного проводов уточняют согласно (17-63) и (17-64) размеры пазов в штампе, мм

$$h_{п2}=N_в h'+h_и+h_б+h_c;$$

$$b_{п2}=N_ш b'+b_и+b_c+\Phi_{ск}.$$

Размеры $h_{п2}$ и $b_{п2}$ округляют до ближайшей большей десятой доли миллиметра.

Определяют плотность тока в обмотке якоря J_2 по (17-54) и произведение $A_2 J_2$. Это произведение сравнивают со средними допускаемыми значениями, приведенными на рис. 17-28 при изоляции класса нагревостойкости F, используемой по нагреву. Для двигателей с изоляцией классов нагревостойкости B или H значения $A_2 J_2$ по рис. 17-28 умножают на поправочные коэффициенты, приведенные в табл. 17-7.

Если полученное по расчету значение $A_2 J_2$ превышает допускаемое более чем на 10%, то выбирают прямоугольный провод больших размеров и соответственно увеличивают размеры паза, следя за тем, чтобы магнитная индукция $B_{с2}$ не превосходила допускаемых значений, указанных в табл. 17-13, а индукция $B_{з2макс}$ значений, указанных в табл. 17-15, с учетом рекомендаций к табл. 17-12. В противном случае произведение $A_2 J_2$ уменьшают так же, как и для полузакрытых пазов (§ 17-3,*б*).

Среднюю ширину секции обмотки $b_{ср}$ определяют по (17-55).

Средняя длина одной лобовой части обмотки, мм,

$$l_{л2}=\frac{b_{ср}}{\sqrt{1-[(b_{п2}+3,5)/t_2]^2}}+h_{п2}+40. \qquad (17\text{-}67)$$

Среднюю длину витка обмотки $l_{ср2}$ определяют по (17-57), а сопротивление обмотки якоря r_a — по (17-58).

Вылет лобовой части обмотки, мм,

$$l_{в2}=\frac{b_{ср}}{2}\frac{(b_{п2}+3,5)/t_2}{\sqrt{1+[(b_{п2}+3,5)/t_2]^2}}+\frac{h_{п2}}{2}+20. \qquad (17\text{-}68)$$

17-4. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ И МЕРЫ ДЛЯ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ

Возникающая при нагрузке поперечная м. д. с. якоря F_2 искажает кривую поля главных полюсов и при насыщенной магнитной системе уменьшает магнитный поток главных полюсов.

Кроме м. д. с. якоря F_2 на основное поле машины воздействует, но в меньшей мере, м. д. с., создаваемая коммутационными токами в короткозамкнутых секциях. Эти токи обусловлены некомпенсированной частью э. д. с. Δe_p, имеющей место также и при отрегулированной коммутации для номинальной нагрузки.

Размагничивающее действие м. д. с. F_2, а также воздействие м. д. с. короткозамкнутых секций удобно определять по кривым $k_{p2}=f(F_2/\Sigma F)$ из рис. 17-30, полученным путем испытания ряда двигателей без компенсационной обмотки при разных значениях магнитной индукции в зубцах B_{z2}, которая для якорей с овальными полузакрытыми пазами соответствует магнитной индукции в равновеликом поперечном сечении зубца B_{z2}, а для якорей с прямоугольными открытыми пазами — магнитной индукции в наиболее узком месте зубца $B_{i2макс}$. Определяемый из рис. 17-30 коэффициент k_{p2} выражает размагничивающее действие реакции якоря в долях F_2:

$$F_{p2}=k_{p2}F_2,\qquad(17\text{-}69)$$

где $F_2=w_2I_2/2a2p$ (выражается в амперах).

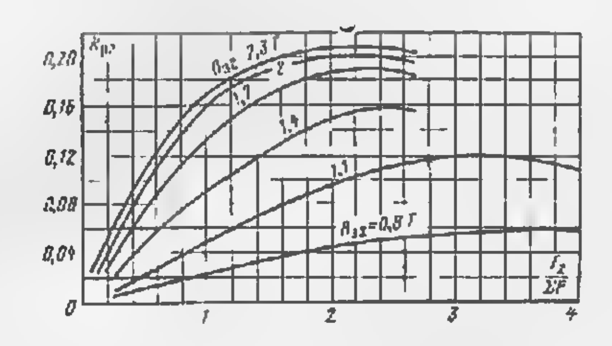


Рис. 17-30. $k_{p2}=f(F_2/\Sigma F)$.

В двигателях с $h=80\div315$ мм для компенсации F_{p2} (не уменьшая при этом искажения поля) и повышения, таким образом, устойчивости работы двигателя на главных полюсах располагают стабилизирующую последовательную обмотку.

Следует при этом учитывать, что реверс таких двигателей усложняется вследствие необходимости переключения стабилизирующей последовательной обмотки.

Другим, менее радикальным способом уменьшения F_{p2} является применение эксцентричного воздушного зазора между якорем и главными полюсами.

При работе двигателей с $h=80\div315$ мм в системах автоматического управления устойчивость работы двигателя может поддерживаться непосредственно элементами этой системы, без применения стабилизирующей последовательной обмотки.

В двигателях с $h=355\div500$ мм, работающих в широком диапазоне регулирования частоты вращения изменением поля главных полюсов и со значительными кратковременными перегрузками, применяют для компенсации м. д. с. якоря F_2 и устранения или уменьшения этим самым искажения кривой поля компенсационную обмотку, располагаемую в пазах наконечников главных полюсов.

Параметры и схема соединений компенсационной обмотки должны быть такими, чтобы м. д. с. этой обмотки F_1, приходящаяся на полюс, была равна или близка м. д. с. якоря, приходящейся на полюсную дугу, А,

$$F'_2=b_{\text{п}\,\text{п}}A_2/20, \qquad (17\text{-}70)$$

и чтобы м. д. с. обеих обмоток были направлены навстречу друг другу. Для обеспечения автоматичности компенсации при изменении нагрузки компенсационную обмотку соединяют последовательно с обмоткой якоря.

Число параллельных ветвей компенсационной обмотки выбирают с учетом следующих условий:

1) ток в пазу $\Sigma I_{\text{п}1}=N_{\text{п}1}I_2/a_1$ в целях лучшего охлаждения, а также для более равномерного распределения м. д. с. F_1 по дуге полюсного наконечника не должен превышать 2500 А. Выполнение этого условия может потребовать вместо последовательного соединения ($a_1=1$) соединение в две параллельные ветви ($a_1=2$); $N_{\text{п}1}$ число проводников в пазу;

2) коэффициент компенсации

$$k_{\text{к}}=F_1/F'_2 \qquad (17\text{-}71)$$

должен находиться в пределах 0,85—1,15.

Различают стержневую и секционную обмотки.

а) Стержневая обмотка

Наибольшее распространение находит стержневая обмотка с прямоугольными полузакрытыми пазами. Стержни обмотки изготовляют из голой меди прямоугольного сечения, изолируют и вставляют с торца в пазы полюсного наконечника (см. рис. 17-5). Соединение стержней осуществляется дугами из голых медных шин (рис. 17-31).

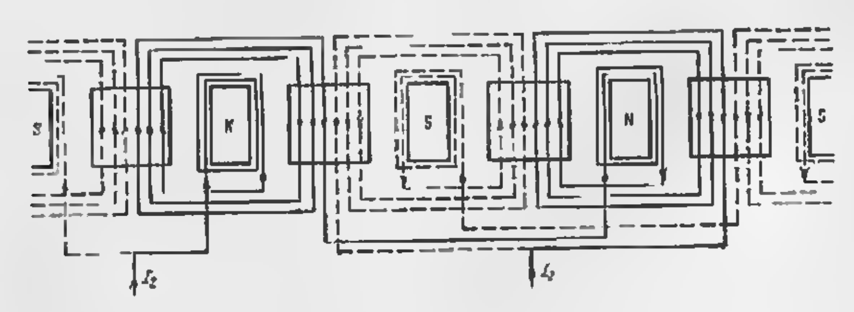


Рис. 17-31. Развернутая схема компенсационной обмотки и соединение ее с обмоткой добавочных полюсов. $2p=4$; $a_1=2$; $N_{\text{п}1}=1$; $Z_1=6$.

Расчет обмотки проводится в следующем порядке.

Определяют число стержней компенсационной обмотки, приходящихся на полюс,

$$N_1=2F'_2a_1/I_2. \qquad (17\text{-}72)$$

Число пазов на полюс

$$Z_1 = N_1/N_ш, \qquad (17\text{-}73)$$

где $N_ш$ — число стержней, располагаемых в пазу по ширине; при этом для облегчения условий производства следует стремиться к выполнению обмотки с $N_ш=1$ и только при невыполнимости обмотки применять $N_ш=2$.

Число пазов Z_1 округляют до ближайшего четного числа, которое для двигателей с $h=355 \div 500$ мм обычно находится в пределах 6—12. После этого корректируют значения N_1 и $N_ш$, уточняют м. д. с. $F_1 = N_1 I_2/2a_1$, $k_к$ и $\Sigma I_{п1}$.

Кроме того, чтобы избежать вибраций магнитного происхождения, необходимо соблюдение условия

$$Z_1 \neq (0{,}9 \div 1{,}1) Z_2 a'/2p; \qquad (17\text{-}74)$$

при невозможности выдержать указанное условие применяют скос пазов на одно зубцовое деление.

Таблица 17-17

Значения $h_и$ и $b_и$ для пазов наконечника главного полюса

Тип обмотки	Класс нагревостойкости изоляции	$h_и$, мм, при $N_в$			$b_и$, мм, при $N_ш$	
		2	3	4	1	2
Секционная	B F, H	3,68 3,6	4,24 4,0	4,8 4,4	2,22 2,5	2,78 2,9
Стержневая	B, F, H	При $N_ш=1$ При $N_ш=2$		$h_и=1,8$ мм; $h_и=2,6$ мм;	$b_и=1,6$ мм $b_и=2,5$ мм	

Зубцовое деление в наиболее узком расчетном сечении зубцов полюсного наконечника, мм,

$$t_{1мин} = \frac{b_{н.п}}{Z_1} \frac{D_{н2} + 2\delta + 2h_ш}{D_{н2} + 2\delta}, \qquad (17\text{-}75)$$

где $h_ш$ — высота шлица паза, равная 0,5 мм.

Ширина зубца в наиболее узком месте, мм,

$$b_{з1мин} = t_{1мин} B_\delta \sigma_{н.п} / k_с B_{з1макс}, \qquad (17\text{-}76)$$

где $\sigma_{н.п}$ — коэффициент магнитного рассеяния наконечника главного полюса, равный в среднем 1,05; $B_{з1макс}$ — магнитная индукция в наиболее узком расчетном сечении зубцов, равная 1,6—1,8 Т; при предварительном выборе значений $B_{з1макс}$ следует учитывать примечание к табл. 17-12.

Ширина паза в штампе, мм,

$$b_{п1} = t_{1мин} - b_{з1мин}. \qquad (17\text{-}77)$$

Допустимая ширина стержня, мм,

$$b_{ст1} = (b_{п1} - b_и - b_с)/N_ш, \qquad (17\text{-}78)$$

где $b_и$ — общая толщина изоляции в пазу по ширине — из табл. 17-17; $b_с$ — припуск на сборку полюса по ширине паза, равный 0,3 мм. Конструкция изоляции приведена в табл. 9-18.

Ширина шлица полузакрытого паза $b_ш=3$ мм.

Полученное значение $b_{ст1}$ округляют до ближайшего стандартного размера из приложения 31.

Площадь поперечного сечения стержня, мм²,

$$q_{ст1}=I_2/a_1J_{ст}, \quad (17\text{-}79)$$

где $J_{ст}$ — плотность тока в стержне, А/мм²; допускаемые значения $J_{ст}$ для двигателей с h=355÷500 мм находятся в следующих пределах в зависимости от класса нагревостойкости изоляции:

Класс нагревостойкости	B	F	H
$J_{ст}$, А/мм²	4,7—5,2	5,3—5,8	6,0—6,6

Высота стержня, мм,

$$h_{ст1}=q_{ст1}/b_{ст1}. \quad (17\text{-}80)$$

Ближайшую стандартную высоту, а также площадь поперечного сечения, соответствующую этой высоте и принятой ширине стержня, определяют по приложению 31.

После выбора стандартных размеров стержня уточняют ширину паза в штампе, мм,

$$b_{п1}=N_{ш}b_{ст1}+b_{и}+b_{с}, \quad (17\text{-}81)$$

плотность тока в стержне $J_{ст}$, ширину зубца $b_{з1мин}$ и магнитную индукцию $B_{з1макс}$ в наиболее узком расчетном сечении зубцов.

Определяют высоту паза в штампе, мм,

$$h_{п1}=h_{ст1}+h_{и}+h_{ш}+h_{с}, \quad (17\text{-}82)$$

где $h_{и}$ — общая толщина изоляции в пазу по его высоте, указанная в табл. 17-17; $h_{с}$ — припуск на сборку полюса по высоте паза, равный 0,3 мм.

Размеры $b_{п1}$ и $h_{п1}$ округляют до ближайшей десятой доли миллиметра.

Больший размер дуги компенсационной обмотки, мм,

$$h_{д1}=(1{,}6\div1{,}8)\,h_{ст1}; \quad (17\text{-}83)$$

$h_{д1}$ округляют до ближайшего стандартного размера из приложения 31.

Площадь поперечного сечения дуги, мм²,

$$q_{д1}=I_2/a_1J_{д1}, \quad (17\text{-}84)$$

где $J_{д1}$ — плотность тока в дуге, равная 0,8—0,9 $J_{ст1}$.

Меньший размер дуги, мм,

$$b_{д1}=q_{д1}/h_{д1}. \quad (17\text{-}85)$$

Ближайший стандартный размер $b_{д1}$, а также площадь поперечного сечения, соответствующую размерам $h_{д1}$ и $b_{д1}$, определяют по приложению 31

После выбора стандартных размеров дуги уточняют плотность тока в дуге $J_{д1}$.

Длина стержня, мм,

$$l_{ст1}=l_{п}+200. \quad (17\text{-}86)$$

Средняя длина соединительной дуги между стержнями, мм,

$$l_{ср.д1}=1{,}1D_{н2}/2p. \quad (17\text{-}87)$$

Сопротивление обмотки, Ом,

$$r_1=r_{ст1}+r_{д1}=\frac{2pN_1l_{ст1}}{\gamma_8a^2_1q_{ст1}10^3}+\frac{2pN_1l_{ср.д1}}{\gamma_8a^2_1q_{д1}10^3}, \quad (17\text{-}88)$$

где γ_8 из табл. 14-29.

б) Секционная обмотка

При необходимости укладки в пазу нескольких стержней в двигателях с числом полюсов $2p=4$ при токе $I_2 \leqslant 1000$ А возможно применение однослойных секционных обмоток, закладываемых в открытые пазы (рис. 17-32). Такие обмотки удобны в производстве и обладают большой надежностью из-за резкого сокращения числа паек.

Целесообразен следующий порядок расчета параметров секционной обмотки.

Число витков обмотки, приходящихся на полюс,

$$w_1 = F'_2 a_1 / I_2; \qquad (17\text{-}89)$$

при токе $I_2 < 500$ А принимают $a_1 = 1$, при $I_2 — 500 \div 1000$ А $a_1 = 2$; w_1 округляют до ближайшего целого числа.

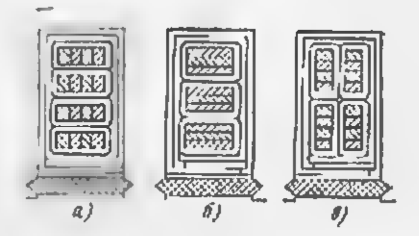


Рис. 17-32. Расположение проводников секционной компенсационной обмотки в пазу при различных значениях $N_ш$ и $N_в$.
$а — N_ш=1$; $N_в=4$, $б — N_ш=1$, $N_в=3$, $в — N_ш=2$; $N_в=2$

Число пазов на полюс

$$Z_1 = 2w_1 / w_{c1}, \qquad (17\text{-}90)$$

где w_{c1} — число витков в секции, которое принято заранее.

Число пазов Z_1 округляют до ближайшего четного числа, находящегося, как при стержневых обмотках, в пределах 6—12 и проверяют выполнение условия (17-74); после чего уточняют значения w_1, м. д. с. $F_1 = w_1 I_2 / a_1$, $k_к$ и $\Sigma I_{п1}$.

Ширину паза в штампе $b_{п1}$ определяют по (17-75)—(17-77).

Допускаемая ширина неизолированного провода, мм,

$$b = (b_{п1} - b_и - b_c) / N_ш, \qquad (17\text{-}91)$$

где $b_и$ — из табл. 17-17; $b_c = 0{,}3$ мм; $N_ш$ — число секций по ширине паза; $N_ш = 1$ или 2.

Эффективные проводники подразделяют на элементарные; из условий технологичности обмотки размеры проводов должны быть не более 3,28×8,0 мм. Размещение проводов может выполняться меньшей или большей стороной по ширине паза.

Площадь поперечного сечения элементарного проводника, мм²,

$$q_1 = I_2 / a_1 c J_1, \qquad (17\text{-}92)$$

где c — число элементарных проводов в эффективном проводнике; J_1 — плотность тока, А/мм², принимаемая такой же, как для стержневых обмоток.

При размещении проводов меньшей стороной по ширине паза (рис. 17-32,$а$) по приложению 31 подбирают ближайшую к расчетному значению площадь поперечного сечения при округленном до стандартного размера меньшем размере элементарного провода b и определяют по указанному приложению соответствующий больший размер провода h. При размещении проводов большей стороной по ширине паза (рис. 17-32,$б$ и $в$) подбор ближайшей к расчетному значению площади

поперечного сечения выполняют при округленном до стандартного размера большем размере провода b, а затем определяют соответствующий меньший размер провода h.

После выбора стандартных размеров проводов уточняют ширину паза в штампе согласно (17-91), мм,

$$b_{п1}=N_{ш}h+b_{и}+b_{с};\qquad(17\text{-}93)$$

высоту паза в штампе, мм,

$$h_{п1}=\frac{w_{с1}}{N_{ш}}h+h_{и}+h_{к}+h_{ш}+h_{с},\qquad(17\text{-}94)$$

где высота клина $h_{к}=2{,}5$ мм; высота шлица $h_{ш}=1{,}0$ мм; $h_{и}$ — из табл. 17-17; конструкция изоляции по табл. 9-19, 9-20; $h_{с}$—0,3 мм; затем уточняют значения $D_{з1макс}$ и J_1.

Средняя ширина секции обмотки, мм,

$$b_{ср}\approx\frac{\pi D_{н2}}{2p}\left(1-\frac{\alpha'}{2}\right).\qquad(17\text{-}95)$$

Длина одной лобовой части витка, мм,

$$l_{л1}=\frac{b_{ср}}{\sqrt{1-[(b_{п1}+5)/t_{1мин}]^2}}+h_{п1}+60.\qquad(17\text{-}96)$$

Средняя длина витка обмотки, мм,

$$l_{ср1}=2(l_{п}+l_{л1}).\qquad(17\text{-}97)$$

Сопротивление обмотки, Ом,

$$r_1=\frac{w_1 l_{ср1}}{\gamma_{\theta}a_1^2 c q_1 10^3},\qquad(17\text{-}98)$$

где γ_{θ} — из табл. 14-29.

Вылет лобовой части обмотки, мм,

$$l_{в1}=\frac{b_{ср}}{2}\frac{(b_{п1}+5)/t_{1мин}}{\sqrt{1-[(b_{п1}+5)/t_{1мин}]^2}}+\frac{h_{п1}}{2}+30.\qquad(17\text{-}99)$$

17-6. ОБМОТКА ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов $F_{д}$ должна скомпенсировать в зоне коммутации м. д. с. якоря F_2 и, кроме того, создать в этой зоне поле, необходимое для индуктирования в коммутируемой секции при вращении якоря э. д. с. $e_{к}$, направленной встречно к э. д. с. $e_{р}$, поэтому отношение $F_{д}/F_2>1$. У двигателей с компенсационной обмоткой м. д. с. $F_{д}$ уменьшают на м. д. с. компенсационной обмотки F_1.

В ряде случаев обмотку добавочных полюсов соединяют в две параллельные ветви, применяя при этом бифилярную схему соединений, при которой не образуется виток с током вокруг вала и, следовательно, не намагничивается вал.

У компенсированных двигателей катушки добавочных полюсов и компенсационной обмотки соединяются друг с другом, чередуясь (рис. 17-31), поэтому у указанных двигателей следует выбирать число параллельных ветвей обеих обмоток одинаковым.

Число витков катушки добавочного полюса у некомпенсированного двигателя

$$w_д=k_д F_2 a_д / I_2, \quad (17\text{-}100)$$

у компенсированного двигателя

$$w_д=(k_д F_2-F_1) a_д / I_2, \quad (17\text{-}101)$$

где $a_д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов; $k_д=F_д/F_2$ у некомпенсированных и $k_д=(F_д+F_1)/F_2$ — у компенсированных двигателей; предварительно значения $k_д$ принимают по табл. 17-18.

Таблица 17-18

Предельные значения $k_д$ двигателей постоянного тока

h, мм	$2p$	$2p_д$	$k_д$
80—100	2	1	1,35—1,45
112—315	4	4	1,2—1,3
355—500	4	4	1,25—1,35

Значение $a_д$ выбирают исходя из следующих условий:

$a_д=1$	$a_д=2$
Некомпенсированные двигатели при $I_2 \leq 1000$ А	Некомпенсированные и компенсированные двигатели при $I_2 > 1000$ А
Компенсированные двигатели при $I_2 \leq 1000$ А и $a_1=1$	Компенсированные двигатели с $a_1=2$
	Двигатели с бифилярной схемой соединения, не образующей виток с током вокруг вала

Полученные из (17-100) или (17-101) значения $w_д$ округляют до целого числа. Округление $w_д$ у обмоток с малым числом витков в катушке может вызвать значительное отклонение от пределов, указанных в табл. 17-18; в этом случае при выборе $a_д$ необходимо ориентироваться на обеспечение необходимых значений $k_д$.

После округления $w_д$ и окончательного выбора $a_д$ уточняют значение м. д. с. добавочных полюсов, А,

$$F_д=w_д I_2 / a_д, \quad (17\text{-}102)$$

а также значение $k_д$.

Площадь поперечного сечения проводника обмотки, мм²,

$$q_д=I_2 / a_д J_д, \quad (17\text{-}103)$$

где $J_д$ — плотность тока в обмотке добавочных полюсов, А/мм²; средние значения $J_д$ приведены на рис. 17-33 при изоляции класса нагревостойкости B (для двигателей с $h=80 \div 200$ мм) и F (для двигателей с $h=225 \div 500$ мм), используемой по нагреву.

Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения $J_д$, приведенные на рис. 17-33, умножаются на поправочные коэффициенты по табл. 17-7.

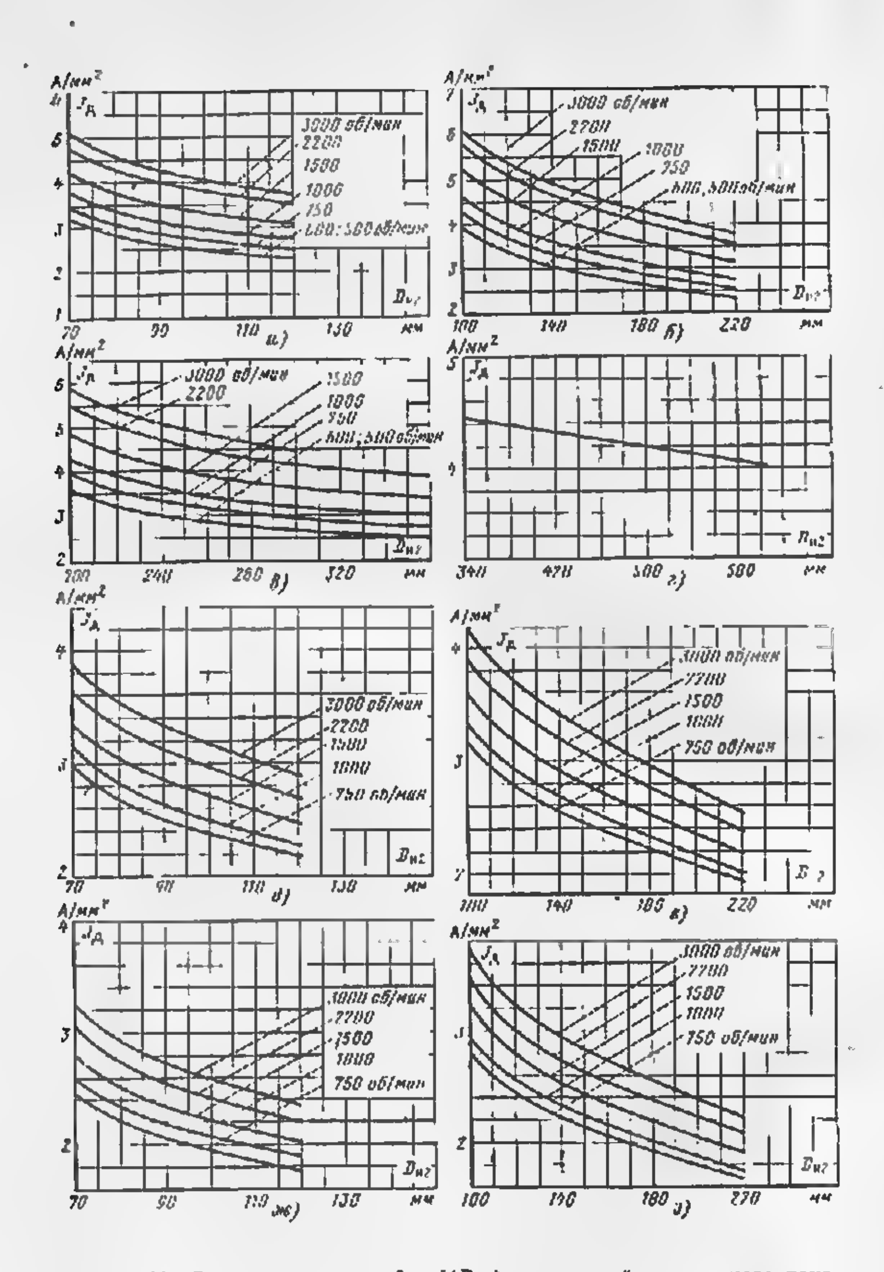


Рис. 17-33. Средние значения $J_д = f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01; обмотка из изолированных проводов, $D_{н2} = 70 \div 120$ мм, $2p_д = 1$; *б* — то же, $D_{н2} = 100 \div 220$ мм; $2p_д = 4$; *в* — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, обмотка из неизолированных проводов, $D_{н2} = 200 \div 300$ мм, $2p_д = 4$; *г* — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17; со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37; обмотка из неизолированных проводов, $D_{н2} = 340 \div 600$ мм, $2p_д = 4$, *д* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, обмотка из изолированных проводов, $D_{н2} = 70 \div 120$ мм; $2p_д = 1$; *е* — то же, $D_{н2} = 100 \div 220$ мм; $2p_д = 4$, *ж* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0041, обмотка из изолированных проводов, $D_{н2} = 70 \div 120$ мм, $2p_д = 1$; *з* — то же, $D_{н2} = 100 \div 200$ мм; $2p_д = 4$.

Тип обмотки, а также форму поперечного сечения проводников принимают, исходя из значений $q_д$:

$q_д$, мм²	Тип обмотки
≤8	Многослойные по ширине и по высоте катушки из изолированных проводов круглого поперечного сечения
>8≤25	Многослойные по ширине и высоте катушки из изолированных проводов прямоугольного поперечного сечения
>25	Однослойные по ширине катушки из голой шинной меди, намотанной на ребро

Для многослойных катушек рекомендуется применение следующих марок проводов:

Поперечное сечение (форма)	q, мм²	Изоляция класса нагревостойкости	Марка провода
Круглое	≤ 3	B F	ПЭТВ ПЭТ-155
То же	> 3 ≤ 8	B F H	ПСД ПСД ПСДК
Прямоугольное	> 8 ≤14	B F	ПЭТВП ПЭТП-155
То же	>14 ≤25	B F H	ПСД ПСД ПСДК

Рекомендации по применению марок проводов круглого поперечного сечения (до 3 мм²) и прямоугольного поперечного сечения (до 14 мм²) двигателей с изоляцией класса нагревостойкости H аналогичны указанным для обмотки якоря в § 17-3, в, г.

Для катушек, наматываемых из изолированных проводов, подбирают по приложениям 30 и 31 размеры круглых проводов d или прямоугольных — b и h таким образом, чтобы площадь поперечного сечения провода была возможно ближе к вычисленной по (17-103). При проводе прямоугольного сечения отношение большей стороны провода к меньшей для удобства намотки выбирают в пределах 1,4—1,8. Затем определяют с учетом толщины изоляции из приложений 30 и 32 размеры изолированного провода d' или b' и h' для марок ПСД, ПСДК, ПЭТВ и ПЭТ-155. Толщина изоляции проводов ПЭТВП и ПЭТП-155 указана в § 17-3,г. У катушек, наматываемых из голой меди, гнутой на ребро, больший размер, равный ширине катушки $b_{кд}$, определяют из рис. 17-34 (кривая 3), округляют до ближайшего большего стандартного размера и определяют меньший размер по приложению 31. Площадь поперечного сечения проводника должна быть возможно ближе к вычисленной по (17-103).

После выбора стандартных размеров проводов уточняют плотность тока, А/мм², согласно (17-103):

$$J_д = I_2 / a_д q_д.$$

Средняя длина витка, мм:

у многослойных катушек из изолированных проводов

$$l_{ср.д} = 2(l_д + b_д) + \pi(b_{к.д} + 2b_з + 2b_и), \qquad (17\text{-}104)$$

где $b_{к.д}$ — средняя ширина катушки, мм; значение $b_{к.д}$ предварительно, до вычерчивания эскиза междуполюсного окна, принимают согласно рис. 17-34; $b_з$ — односторонний зазор между изолированным сердечником полюса и катушкой, мм:

$$b_з \approx 0{,}23\sqrt[3]{D_{н2}};$$

$b_и$ — односторонняя толщина изоляции сердечника добавочного полюса (табл. 9-15—9-17);

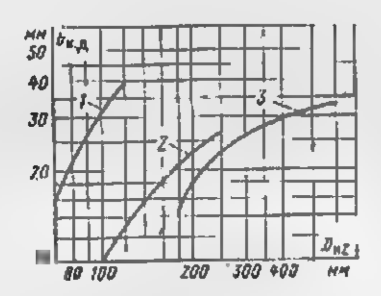


Рис. 17-34. Средние значения $b_{к.д} = f(D_{н2})$.

1 — многослойные катушки из изолированных проводов, $2p_д = 1$; 2 — то же, $2p_д = 4$; 3 — однослойные катушки из неизолированной меди, гнутой на ребро, $2p_д = 4$

у однослойных катушек из голых проводов, намотанных на ребро,

$$l_{ср.д} = 2l_д + \pi(b_д + b_{к.д} + 2b_з + 2b_и), \qquad (17\text{-}105)$$

где $b_{к.д}$ равна большему размеру провода; $b_и = 2$ мм; $b_з = 3$ мм.

Радиус закругления меди r, равный $(b_д + 2b_з + 2b_и)/2$, должен быть больше минимально допустимого значения, определяемого условиями намотки, мм:

$$r \geqslant 0{,}05b^2/h. \qquad (17\text{-}106)$$

Сопротивление обмотки, Ом,

$$r_д = \frac{2p_д w_д l_{ср.д}}{\gamma_\theta a_д q_д \cdot 10^3}, \qquad (17\text{-}107)$$

где γ_θ — из табл. 14-9.

17-7. СТАБИЛИЗИРУЮЩАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ОБМОТКА ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ

Стабилизирующую последовательную обмотку, применяемую для обеспечения устойчивости работы двигателя, располагают в виде катушек на главном полюсе у станины или у полюсного наконечника. В ряде случаев катушку стабилизирующей обмотки располагают между секциями параллельной обмотки возбуждения; тогда она одновременно выполняет роль дистанционной прокладки, увеличивающей поверхность охлаждения параллельной обмотки.

У двигателей с компенсационной обмоткой и у двигателей с относительно малым размагничивающим действием реакции якоря стабилизирующую обмотку не применяют.

Магнитодвижущая сила стабилизирующей обмотки некомпенсированных двигателей на один полюс, А,

$$F_c=(0,1\div0,2)F_2. \qquad (17\text{-}108)$$

Число витков в катушке

$$w_c=F_c a_c/I_2, \qquad (17\text{-}109)$$

где a_c — число параллельных ветвей стабилизирующей обмотки; обычно катушки обмотки соединяют последовательно ($a_c=1$); в отдельных случаях применяют соединение в две параллельные ветви ($a_c=2$).

Полученное из (17-109) значение w_c округляют до ближайшего целого числа. Для обеспечения необходимого значения F_c при малом числе витков в катушке может быть целесообразным применение $a_c=2$; допускают выполнение катушек с полувитком ($2^1/_2$, $3^1/_2$ и т. д.) — при этом соединения располагают по обеим торцевым сторонам катушек — или выполнение катушек с нечетным числом витков с расположением на полюсах только одной полярности.

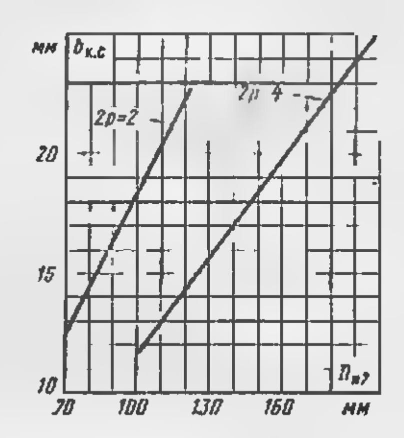


Рис. 17-35. Средние значения $b_{к.с}=f(D_{н2})$ катушек из изолированных проводов.

Марки и размеры проводов для унификации выбирают такими же, как у обмотки добавочных полюсов. При невозможности по условиям конструкции или расчета осуществить указанную унификацию определяют площадь поперечного сечения провода стабилизирующей обмотки, мм²,

$$q_c=I_2/a_c J_c, \qquad (17\text{-}110)$$

где J_c — плотность тока в обмотке, которую принимают такой же, как у обмотки добавочных полюсов.

Тип обмотки, а также форму поперечного сечения проводов принимают, исходя из значений q_c:

Тип обмотки	q_c, мм²
Однослойные или многослойные по высоте катушки из изолированных проводов круглого поперечного сечения	⩽8
Однослойные или многослойные по высоте катушки из изолированных проводов прямоугольного поперечного сечения	>8⩽25
Однослойные по ширине катушки из голой шинной меди, намотанной на узкую сторону (на ребро)	>25

Рекомендации по выбору марок проводов и методика определения их размеров аналогичны приведенным в § 17-6 для обмотки добавочных полюсов.

После выбора стандартных размеров проводов уточняют плотность тока в обмотке, А/мм², согласно (17-110):

$$J_c=I_2/a_c q_c.$$

Средняя длина витка, мм:

у однослойных или многослойных катушек из изолированных проводов

$$l_{ср.с}=2(l_п+b_п)+\pi(b_{к.с}+2b_з+2b_и), \quad (17\text{-}111)$$

где $b_{к.с}$ — средняя ширина катушки, мм; значение $b_{к.с}$ предварительно, до вычерчивания эскиза междуполюсного окна, принимают согласно рис. 17-35; $b_з$ — односторонний зазор между изолированным сердечником полюса и катушкой, вычисляемый так же, как для обмотки добавочных полюсов; $b_и$ — односторонняя толщина изоляции сердечника главного полюса (см. табл. 9-15—9-17);

у однослойных катушек из голых проводов, намотанных на ребро,

$$l_{ср.с}=2(l_п+b_п)+\pi(b_{к.с}+2r), \quad (17\text{-}112)$$

где радиус закругления r, мм, должен удовлетворять условию (17-106).

Сопротивление обмотки, Ом,

$$r_c=\frac{2p w_c l_{ср.с}}{\gamma_\theta a^2_c q_c \cdot 10^3}, \quad (17\text{-}113)$$

где γ_θ — из табл. 14-9.

17-8. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ

Магнитная цепь двигателя постоянного тока, как и других вращающихся электрических машин, симметрична, поэтому достаточно производить расчет м. д. с., приходящейся на один полюс.

Магнитную цепь двигателя можно рассматривать как состоящую из семи однородных участков, соединенных последовательно: воздушный зазор между якорем и наконечником главного полюса, зубцы якоря, спинка якоря, наконечник главного полюса (только у компенсированных двигателей), сердечник главного полюса, зазор между главным полюсом и станиной, станина. При расчете магнитного напряжения каждого участка принимают, что магнитная индукция на участке распределена равномерно.

Для каждого участка определяют его площадь поперечного сечения, магнитную индукцию, напряженность поля, расчетную длину средней магнитной силовой линии, магнитное напряжение участка, суммарную м. д. с.

а) Магнитный поток при номинальном режиме работы

Электродвижущая сила при номинальном режиме работы, В,

$$E_2=U-I_2\Sigma r_2-\Delta U_щ, \quad (17\text{-}114)$$

где Σr_2 — сумма сопротивлений обмоток якорной цепи (якоря, компенсационной, добавочных полюсов и стабилизирующей последовательной обмотки главных полюсов), приведенных к расчетной рабочей температуре; $\Delta U_щ$ — падение напряжения под щетками обеих полярностей, условно принимаемое не зависящим от тока и равным 2 В.

Уточненное значение магнитного потока, Вб,

$$\Phi=\frac{30E_2}{(p/a)\,n w_2}. \quad (17\text{-}115)$$

б) Воздушный зазор между якорем и главным полюсом

Площадь поперечного сечения воздушного зазора, мм²,

$$Q_\delta = b'_{\text{н.п}} l'_z. \qquad (17\text{-}116)$$

Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_\delta = \Phi \cdot 10^6 / Q_\delta. \qquad (17\text{-}117)$$

Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_\delta = 0{,}8\delta k_\delta B_\delta \cdot 10^3, \qquad (17\text{-}118)$$

где k_δ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние на магнитное сопротивление зазора шлицов в пазах наконечника главного полюса компенсированной машины k_{z1} и якоря k_{z2}, бандажных канавок на сердечнике якоря $k_б$ и радиальных каналов $k_к$:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_б k_к. \qquad (17\text{-}119)$$

При полузакрытых пазах наконечника главного полюса или якоря

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_ш}{t_1 - b_ш + 5\delta t_1 / b_ш}; \qquad (17\text{-}120)$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_ш}{t_2 - b_ш + 5\delta t_2 / b_ш} \qquad (17\text{-}121)$$

в (17-120) подставляют $b_ш$ паза полюсного наконечника, а в (17-121) $b_ш$ паза якоря.

При открытых пазах $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ вычисляют по указанным выше формулам с подстановкой вместо ширины шлица $b_ш$ ширины паза $b_{п1}$ и $b_{п2}$.

Коэффициент, учитывающий наличие бандажных канавок на якоре: при стеклобандажах или бандажах из немагнитной проволоки

$$k_б = 1 + \frac{n_б l_б h_б}{l_2(\delta + h_б) - n_б l_б h_б}, \qquad (17\text{-}122)$$

при бандажах из магнитной проволоки

$$k_б = 1 + \frac{n_б l_б (h_б - 0{,}8d)}{l_2(\delta + h_б - 0{,}8d) - n_б l_б (h_б - 0{,}8d)}, \qquad (17\text{-}123)$$

где $n_б$ — число бандажных канавок; $l_б$ — длина бандажной канавки, мм; $h_б$ — высота бандажной канавки, мм; d — диаметр бандажной проволоки, мм.

Предварительно, до проведения механического расчета бандажей, принимают у двигателей первой длины на данном диаметре якоря $n_б l_б = 0{,}35 l_2$, а второй длины $0{,}25 l_2$; $d \approx 0{,}5 h_б$; $n_б = 2 \div 4$.

Коэффициент радиальных вентиляционных каналов, учитывающий ответвление части магнитного потока в каналы якоря,

$$k_к = 1 - \frac{3\delta}{l_{п2} + 3\delta(1 + l_{п2}/l_{к2})}. \qquad (17\text{-}124)$$

в) Зубцы якоря

А. Овальные полузакрытые пазы

Площадь равновеликого поперечного сечения зубцов, мм²,

$$Q_{з2} = Z_2\alpha' b_{з2} l_{эф2}/2p. \quad (17\text{-}125)$$

Магнитная индукция в равновеликом сечении зубцов, Т,

$$B_{з2}=\Phi\cdot 10^6/Q_{з2}. \quad (17\text{-}126)$$

Напряженность магнитного поля в зубце $H_{з2}$, А/см, при $B_{з2}\leqslant 1{,}8$ Т определяют по приложению 15; при $B_{з2}>1{,}8$ Т — по приложению 26 в зависимости от коэффициента $k_з$, учитывающего ответвление части магнитного потока в паз. Коэффициент $k_з$ определяют для соотношения сечений зубца и паза на 1/3 высоты, считая от его наиболее узкой части:

$$k_{з(1/3)} = t_{2(1/3)}/b_{з2}k_c, \quad (17\text{-}127)$$

где $t_{2(1/3)} = \pi(D_{н2} - 4/3h_{п2})/Z_2$.

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце, мм,

$$L_{з2}=h_{п2}-0{,}2r_2. \quad (17\text{-}128)$$

Магнитное напряжение зубцов, А,

$$F_{з2}=0{,}1H_{з2}L_{з2}. \quad (17\text{-}129)$$

Б. Прямоугольные открытые пазы

В расчетном наименьшем сечении:

ширина зубца, мм,

$$b_{з2мин} = \pi(D_{н2}-2h_{п2})/Z_2 - b_{п2}, \quad (17\text{-}130)$$

здесь и далее $b_{п2}$ и $h_{п2}$ — уточненные размеры паза, мм;

площадь поперечного сечения, мм²,

$$Q_{з2мин} = Z_2\alpha' b_{з2мин} l_{эф2}/2p; \quad (17\text{-}131)$$

магнитная индукция, Т,

$$B_{з2макс} = \Phi\cdot 10^6/Q_{з2мин}. \quad (17\text{-}132)$$

При $B_{з2макс}\leqslant 1{,}8$ Т напряженность поля $H_{з2}$ определяют на 1/3 высоты зубца, считая от его наиболее узкой части. В этом расчетном сечении:

ширина зубца, мм,

$$b_{з2(1/3)} = t_{2(1/3)} - b_{п2}; \quad (17\text{-}133)$$

площадь поперечного сечения, мм²,

$$Q_{з2(1/3)} = Q_{з2мин}(b_{з2(1/3)}/b_{з2мин}); \quad (17\text{-}134)$$

магнитная индукция, Т,

$$B_{з2(1/3)}=\Phi\cdot 10^6/Q_{з2(1/3)}. \quad (17\text{-}135)$$

Напряженность магнитного поля определяют по приложениям 16 и 17 в зависимости от принятой марки стали.

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце, мм,

$$L_{з2}=h_{п2}. \quad (17\text{-}136)$$

Магнитное напряжение зубцов определяют по (17-129).

При $B_{з2макс} > 1{,}8$ Т напряженность поля определяют в трех расчетных сечениях зубца — минимальном, среднем и максимальном.

Ширина зубца в расчетных сечениях, мм,

$$b_{з2мин} \text{ — по (17-130)};$$

$$b_{з2макс} = t_2 - b_{п2}; \tag{17-137}$$

$$b_{з2ср} = (b_{з2мин} + b_{з2макс})/2. \tag{17-138}$$

Площадь расчетных сечений, мм²,

$$Q_{з2мин} \text{ — по (17-131)};$$

$$Q_{з2макс} = Q_{з2мин}(b_{з2макс}/b_{з2мин}); \tag{17-139}$$

$$Q_{з2ср} = (Q_{з2мин} + Q_{з2макс})/2. \tag{17-140}$$

Магнитные индукции в расчетных сечениях, Т,

$$B_{з2макс} \text{ — по (17-132)};$$

$$B_{з2мин} = \Phi \cdot 10^6/Q_{з2макс}; \tag{17-141}$$

$$B_{з2ср} = (B_{з2макс} + B_{з2мин})/2. \tag{17-142}$$

Напряженность поля для каждого из расчетных сечений зубца, если индукция в них превышает 1,8 Т, определяют по приложению 27 с учетом коэффициентов $k_{з2}$:

для $B_{з2макс}$

$$k_{з2макс} = \pi(D_{я} - 2h_{п2})/Z_2 b_{з2мин} k_c; \tag{17-143}$$

для $B_{з2мин}$

$$k_{з2мин} = t_2/b_{з2макс} k_c; \tag{17-144}$$

для $B_{з2ср}$

$$k_{з2ср} = (k_{з2макс} + k_{з2мин})/2. \tag{17-145}$$

Расчетное значение напряженности поля, А/см,

$$H_{з2} = (H_{з2макс} + 4H_{з2ср} + H_{з2мин})/6. \tag{17-146}$$

Расчетную длину магнитной силовой линии и магнитное напряжение зубцов определяют по (17-129) и (17-136).

г) Спинка якоря

Высота спинки якоря, мм,

$$h_{c2} = (D_{н2} - D_2)/2 - h_{п2}. \tag{17-147}$$

Расчетное сечение якоря, мм²,

$$Q_{c2} = l_{ст2}(h_{c2} - {}^2/_3 d_{к2}). \tag{17-148}$$

Магнитная индукция в спинке якоря, Т,

$$B_{c2} = \Phi \cdot 10^6/2Q_{c2}. \tag{17-149}$$

Напряженность магнитного поля в спинке H_{c2} определяют по приложениям 15—17 в зависимости от принятой марки стали.

Расчетная длина магнитной силовой линии, мм,

$$L_{c2} = \pi(D_2 + h_{c2})/4p + h_{c2}/2. \tag{17-150}$$

Магнитное напряжение спинки якоря, А,

$$F_{c2} = 0{,}1 H_{c2} L_{c2}. \tag{17-151}$$

д) Зубцы наконечника главного полюса компенсированных двигателей

Индукция $B_{з1макс}$ в зубцах наконечника главного полюса обычно не превышает 1,8 Т, поэтому напряженность поля $H_{з1}$ определяют на 1/3 высоты зубца, считая от его наиболее узкой части. В этом расчетном сечении:

длина дуги полюсного наконечника, мм,

$$b_{н.п(1/3)}=b_{н.п}\left(1+\frac{2/3h_{п1}}{D_{н}+2\delta}\right); \quad (17\text{-}152)$$

площадь поперечного сечения зубцов, мм²,

$$Q_{з1(1/3)}=l_{эф.п}(b_{н.п(1/3)}-Z_1 b_{п1}), \quad (17\text{-}153)$$

где $l_{эф.п}=k_c l_п$.

Магнитная индукция, Т,

$$B_{з1(1/3)}=\sigma_{н.п}\Phi\cdot 10^6/Q_{з1(1/3)}. \quad (17\text{-}154)$$

Напряженность магнитного поля $H_{з1}$ определяют из приложения 28.

Расчетная длина магнитной силовой линии, мм,

$$L_{з1}=h_{п1}. \quad (17\text{-}155)$$

Магнитное напряжение зубцов, А,

$$F_{з1}=0,1H_{з1}L_{з1}. \quad (17\text{-}156)$$

е) Сердечник главного полюса

Площадь поперечного сечения сердечника полюса, мм²,

$$Q_п=l_{эф.п}b_п. \quad (17\text{-}157)$$

Магнитная индукция в расчетном сечении, Т,

$$B_п=\sigma\Phi\cdot 10^6/Q_п. \quad (17\text{-}158)$$

Напряженность магнитного поля $H_п$ определяют по приложению 28.

Расчетная длина магнитной силовой линии, мм:

для некомпенсированного двигателя

$$L_п=h_п; \quad (17\text{-}159)$$

для компенсированного двигателя

$$L_п=h_п-h_{п1}. \quad (17\text{-}160)$$

Магнитное напряжение сердечника полюса, А,

$$F_п=0,1H_пL_п. \quad (17\text{-}161)$$

ж) Зазор между главным полюсом и станиной

Неплотное прилегание сердечника главного полюса к станине двигателей с высотами оси вращения до 315 мм включительно приближенно оценивается эквивалентным зазором, мм,

$$\delta_{п1}=2l_п\cdot 10^{-4}+0,1. \quad (17\text{-}162)$$

Магнитное напряжение зазора между главным полюсом и станиной, А,

$$F_{п1}=0,8\delta_{п1}B_п\cdot10^3. \quad (17\text{-}163)$$

У двигателей с высотами оси вращения более 315 мм значением $F_{п1}$ пренебрегают вследствие его малого влияния на результирующую м. д. с. магнитной цепи.

з) Станина

Площадь поперечного сечения станины, мм²:
для массивной станины

$$Q_{с1}=l_1h_{с1}; \quad (17\text{-}164)$$

для шихтованной станины

$$Q_{с1}=k_сl_1h_{с1}. \quad (17\text{-}165)$$

Магнитная индукция в расчетном сечении, Т,

$$B_{с1}=\sigma\Phi\cdot10^6/2Q_{с1}. \quad (17\text{-}166)$$

Если полученное значение $B_{с1}$ ниже принятого в (17-11), можно уменьшить $h_{с1}$ и увеличить $h_п$, а при превышении предельного допустимого значения, указанного в § 17-2,б, — увеличить $h_{с1}$ и уменьшить $h_п$ или $D_{н2}$.

Напряженность магнитного поля $H_{с1}$ определяют для массивной станины из приложения 29, а для шихтованной станины — из приложения 16.

Расчетная длина магнитной силовой линии, мм,

$$L_{с1}=\pi(D_1+h_{с1})/4p+h_{с1}/2. \quad (17\text{-}167)$$

Магнитное напряжение станины, А,

$$F_{с1}=0,1H_{с1}L_{с1}. \quad (17\text{-}168)$$

и) Магнитодвижущая сила магнитной цепи

Магнитодвижущая сила магнитной цепи на один полюс, А,

$$\Sigma F=F_\delta+F_{з2}+F_{с2}+F_{з1}+F_п+F_{п1}+F_{с1}. \quad (17\text{-}169)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_н=\Sigma F/(F_\delta+F_{з1}). \quad (17\text{-}170)$$

к) Характеристика намагничивания двигателя

Магнитный поток Ф, соответствующий э. д. с. при номинальном режиме работы двигателя, принимают за единицу. Для построения характеристики намагничивания двигателя $\Phi=f(\Sigma F)$ определяют ΣF при значениях магнитного потока 0,5; 0,75; 0,9; 1,1, а также 1,15Ф (если при этом $B_{з2макс}$ не превышает 2,5—2,6 Т). Характеристику строят в прямоугольных координатах по указанным выше пяти значениям Ф и по ранее рассчитанным значениям Ф и ΣF при номинальном режиме работы.

Расчет характеристики намагничивания целесообразно проводить по форме табл. 17-19.

Таблица 17-19

Данные расчета характеристики намагничивания двигателя

Наименование участка	Расчетная длина силовых линий, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм²	Ф, о. е.	0,50			0,75			0,90			1,00			1,10			1,15		
			Ф, Вб																		
			Коэффициенты	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А
Зазор между якорем и главным полюсом			k_δ																		
Зубцы якоря			$k_{з\,мин}$																		
			$k_{з\,ср}$																		
			$k_{з\,макс}$																		
Спинка якоря																					
Наконечник главного полюса			$\sigma_{г.п}$																		
Сердечник главного по-[redacted]			σ																		
Зазор между главным полюсом и станиной																					
Станина																					
ΣF, А																					

У двигателей с высотами оси вращения до 200 мм включительно катушки параллельного или независимого возбуждения главных полюсов выполняют сплошными, без подразделения на секции. У двигателей с высотами оси вращения более 200 мм часто применяют секционированные катушки обмотки возбуждения; при таком исполнении катушек увеличивается поверхность охлаждения, что дает возможность повысить плотность тока в обмотке и уменьшить массу меди катушек.

Магнитодвижущая сила обмотки параллельного или независимого возбуждения, приходящаяся на один полюс некомпенсированного двигателя, А,

$$F_ш = \Sigma F + F_{р2} - F_с. \quad (17\text{-}171)$$

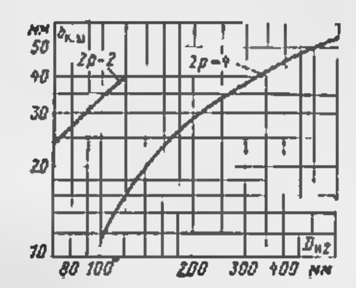


Рис. 17-36. Средние значения $b_{к.ш} = f(D_{н2})$ катушек из изолированных проводов.

Размагничивающее действие реакции якоря, А,

$$F_{р2} = k_{р2} F_2, \quad (17\text{-}172)$$

где $k_{р2}$ определяют из рис. 17-30 в зависимости от магнитной индукции в зубцах и отношения $F_2/\Sigma F$.

У компенсированного двигателя

$$F_ш \approx \Sigma F. \quad (17\text{-}173)$$

Средняя длина витка обмотки, мм,

$$l_{ср.ш} = 2(l_п + b_п) + \pi(b_{к.ш} + 2b_з + 2b_к), \quad (17\text{-}174)$$

где $b_{к.ш}$ — ширина катушки (секции), мм; значение $b_{к.ш}$ предварительно, до вычерчивания эскиза междуполюсного окна, принимают из рис. 17-36; $b_з$ и $b_к$ принимают такими же, как для обмотки добавочного полюса из изолированных проводов в § 17-6.

Площадь поперечного сечения провода, мм², при последовательном соединении катушек

$$q_ш = k_{зап} 2p F_ш l_{ср.ш} / \gamma_θ U \cdot 10^3, \quad (17\text{-}175)$$

где $k_{зап}$ — коэффициент запаса м. д. с. обмотки, учитывающий возможные отклонения параметров магнитной цепи и обмоток от расчетных данных; $k_{зап}$ принимают только для двигателей с регулированием частоты вращения изменением поля главных полюсов; значение его обычно находится в пределах 1,1—1,2; для расчета подставляют среднее значение 1,15; $\gamma_θ$ — из табл. 14-29; при расчете обмотки независимого возбуждения в формулу подставляют напряжение независимого возбуждения.

Выбор марок и размеров проводов осуществляют в соответствии с рекомендациями для многослойных катушек обмотки добавочных полюсов в § 17-6.

При отклонении выбранной стандартной площади поперечного сечения от расчетной корректируют значение $k_{зап} F_ш$ пропорционально изменению указанной площади.

Число витков на полюс

$$w_ш = k_{зап} F_ш / J_ш q_ш, \quad (17\text{-}176)$$

где $J_ш$ — плотность тока в обмотке возбуждения главных полюсов, А/мм²; средние значения $J_ш$ приведены на рис. 17-37 при изоляции класса нагревостойкости B (для двигателей с h=80÷200 мм) и F (для двигателей с h=225÷500 мм), используемой по нагреву. Для двигателей с изоляцией других классов нагревостойкости значения $J_ш$, приведенные на рис. 17-37, умножаются на поправочные коэффициенты, приведенные в табл. 17-7.

Число витков $w_ш$ округляют, после чего уточняют плотность тока согласно (17-176):

$$J_ш = k_{зап} F_ш / w_ш q_ш.$$

Сопротивление обмотки, Ом,

$$r_ш = 2p w_ш l_{ср.ш} / \gamma_\theta q_ш \cdot 10^3, \tag{17-177}$$

где γ_θ — из табл. 14-29.

Максимальный ток обмотки возбуждения, А.

$$I_ш = U / r_ш. \tag{17-178}$$

17-10. РАЗМЕЩЕНИЕ ОБМОТОК ГЛАВНЫХ И ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Принятые при расчете параметры обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов (числа витков и размеры проводников) должны быть проверены с точки зрения возможности размещения этих обмоток в междуполюсном окне. При этом воздушные промежутки между выступающими краями катушек главных и добавочных полюсов должны быть не менее 6 мм у двигателей с высотами оси вращения до 200 мм включительно и 8 мм — при больших высотах оси вращения. Такие же расстояния должны быть обеспечены между выступающими краями катушек и внутренней поверхностью станины, если между станиной и катушками не располагают специальных изоляционных прокладок.

Размещение катушек при составлении эскиза междуполюсного окна производится с учетом их разбухания при намотке и от пропитки.

а) Многослойные катушки из изолированного провода круглого поперечного сечения

Средние коэффициенты разбухания катушек из проводов круглого поперечного сечения по ширине $k_{р.ш}$ и по высоте $k_{р.в}$ катушки принимают одинаковыми и зависящими от диаметра провода:

d, мм	≤0,77	0,8—1,56	1,62—3,05
$k_{р.ш}$, $k_{р.в}$	1,06	1,05	1,04

Катушка может иметь одинаковую ширину по всему сечению или быть скошенной для наиболее рационального использования междуполюсного окна.

Размеры катушек или ее отдельных участков, мм

по ширине

$$b_к = k_{р.ш} N_ш d', \tag{17-179}$$

по высоте

$$h_к = k_{р.в} N_в d', \tag{17-180}$$

где $N_ш$ и $N_в$ — числа проводников по ширине и по высоте катушки или ее участка.

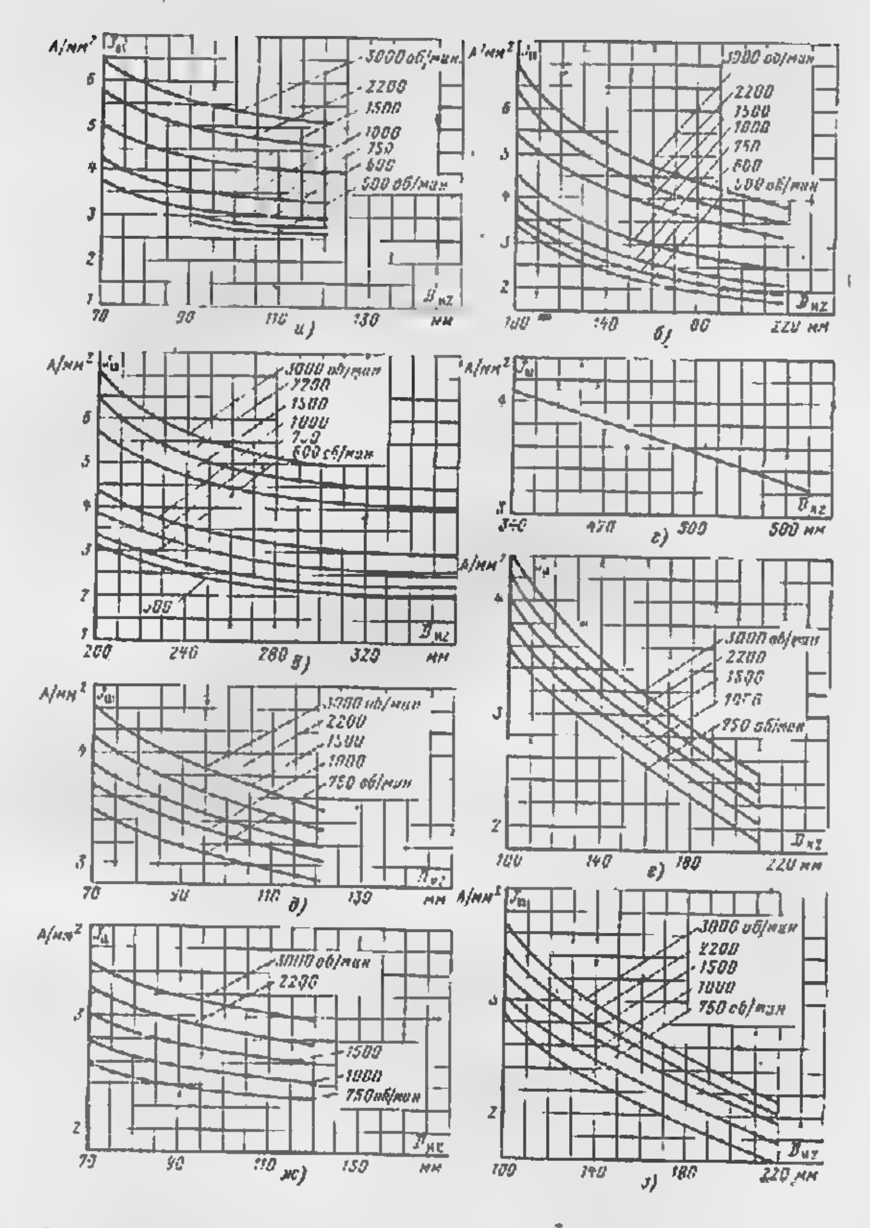


Рис. 17-37. Средние значения $J_{ш}=f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, сплошные катушки, $D_{н2}=70\div120$ мм, $2p=2$; *б* — то же, $D_{н2}=100\div220$ мм, $2p=4$; *в* — со степенью защиты IP22 способом охлаждения IC01; секционированные катушки, $D_{н2}=200\div360$ мм; $2p=4$; *г* — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17, со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37, секционированные катушки; $D_{н2}=340\div500$ мм, $2p=4$; *д* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141; сплошные катушки, $D_{н2}=70\div120$ мм, $2p=2$; *е* — то же, $D_{н2}=100\div200$ мм, $2p=4$; *ж* — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0041, сплошные катушки, $D_{н2}=70\div120$ мм; $2p=2$; *з* — то же, $D_{н2}=100\div220$ мм; $2p=4$.

б) Многослойные катушки из изолированного провода прямоугольного поперечного сечения

Средние коэффициенты разбухания катушек из проводов прямоугольного поперечного сечения по ширине и по высоте принимают в зависимости от площади поперечного сечения проводов равными:

q, мм²	8—14	14—25
$k_{р.ш}$, $k_{р.в}$	1,05*	1,05

* Для эмалированного провода.

Катушка может иметь одинаковую ширину по всему сечению или быть ступенчатой. Витки распределяют, исходя из намотки проводов «плашмя», т. е. большей стороной по высоте.

Размеры катушек или ее отдельных участков составляют, мм: по ширине

$$b_{к}=k_{р.ш}N_{ш}b', \qquad (17\text{-}181)$$

по высоте

$$h_{к}=k_{р.в}N_{в}h'. \qquad (17\text{-}182)$$

в) Однослойные катушки добавочных полюсов из голой меди, намотанной на ребро

Ширина катушки $b_{к.д}$ равна размеру большей стороны ширины.

Высота катушки, мм,

$$h_{к.д}=k_{р.в}[w_{д}h+(w_{д}-3)h_{и}]+b'_{и}, \qquad (17\text{-}183)$$

где h — меньший размер шины (размер по высоте); среднее значение коэффициента разбухания по высоте $k_{р.в}=1{,}03$; $h_{и}$ — толщина изоляционных прокладок между витками, равная 0,3 мм; $b_{и}'$ — толщина усиленной изоляции крайних витков катушки, равная 2 мм.

Катушки добавочных полюсов для уменьшения магнитного рассеяния располагают возможно ближе к краю полюса (к наконечнику).

При невозможности разместить рассчитанные обмотки главных и добавочных полюсов в междуполюсном окне следует увеличить внутренний диаметр станины, если при заданной высоте оси вращения это возможно, либо повысить плотность тока в обмотках возбуждения за счет применения более нагревостойкой изоляции.

17-11. ЩЕТКИ И КОЛЛЕКТОР

Марку щеток определяют в соответствии с условиями работы двигателя по табл. 17-20.

При определении размеров щеток следует учитывать, что уменьшение ширины щетки влечет за собой удлинение коллектора, а увеличение ширины ограничивается возрастанием при этом ширины зоны коммутации, что может повлечь за собой воздействие поля главных полюсов на коммутирующие секции. Это воздействие оценивается отношением $k_{з.к}$ ширины зоны коммутации $b_{з.к}$ к нейтральной зоне главных полюсов $\tau - b_{н.п}$, которое по возможности не должно превышать пределов, указанных в табл. 17-21. Кроме того, ширина щетки должна обеспечивать перекрытие необходимого числа коллекторных делений.

Расчетная ширина щетки, мм,

$$b'_{щ} \leq k_{з.к}(\tau - b_{н.п})\frac{D_к}{D_{н2}} - t_к\left(N_{щ} + \varepsilon_к - \frac{a}{p}\right), \quad (17\text{-}184)$$

где укорочение

$$\varepsilon_к = K/2p - y_1,$$

$\varepsilon_к$ подставляют в (17-184) всегда со знаком плюс.

Полученное значение $b'_{щ}$ округляют до ближайшего стандартного размера $b_{щ}$ согласно табл. 17-21, где приведены значения ширины щеток, обычно применяемые в электромашиностроении. Щетки шириною 25 и 32 мм подразделяют на две (т. е. 2×12,5 или 2×16 мм), что улучшает контакт щеток с коллектором при вибрациях и толчках и, следовательно, благоприятно влияет на коммутацию двигателей.

Таблица 17-20

Основные технические данные щеток

Условия работы двигателя	Наименование групп марок	Обозначение марок	$\Delta U_{щ}$ (на пару щеток), В	Предельная плотность $J_{щ}$, А/см²	Окружная скорость коллектора $v_к$, м/с	Давление на щетку, Па
Облегченная коммутация ($e_р \leq 3$ В)	Графитные	611М	1,4	12	40	(2—2,5)·10⁴
Средняя и затрудненная коммутация ($e_р > 3$ В)	Электрографитированные	ЭГ4 ЭГ14 ЭГ71 ЭГ74	2,0 2,0 2,2 2,2	12 11 12 15	40 40 40 50	(1,5—2)·10⁴ (2—4)·10⁴ (2—2,5)·10⁴ (1,75—2,5)·10⁴
Для двигателей со степенью защиты IP44 и кремнийорганической изоляцией (класс нагревостойкости Н)	Электрографитированные	ЭГ74К	2,4	12	60	(1,7—2,7)·10⁴

Примечание. Коэффициент трения щеток о коллектор принимают равным 0,25 для всех марок щеток.

Таблица 17-21

Предельные допустимые значения $k_{з.к}$ и рекомендуемые ширины щеток

$D_{н2}$, мм	70—100	>100—200	>200—400	>400
Максимальное допустимое значение $k_{з.к}$	0,75	0,75	0,7	0,6
Стандартная ширина щетки $b_{щ}$, мм	8; 10	10; 12,5; 16; 25	20; 25	25; 32

Опыт изготовления и эксплуатации двигателей показал, что применение щеток шириной более 32 мм и длиной более 40 мм нецелесообразно. Если расчетная ширина щетки $b'_{щ}$ больше 32 мм, или если она значительно отличается от стандартных размеров, применяют раздвижку щеток на величину $\Delta_р = b'_{щ} - b_{щ}$ путем установки между

бракетами и отдельными щеткодержателями дистанционных прокладок.

Число перекрытых щеткой коллекторных делений

$$\gamma = b_щ/t_к; \quad (17\text{-}185)$$

при наличии раздвижки щеток

$$\gamma' = b'_щ/t_к. \quad (17\text{-}186)$$

Рекомендуются следующие значения γ и γ':

Тип обмотки якоря	γ или γ'
Простая волновая	2—4
Простая петлевая	$\geq (N_щ+0,5)$
Двухходовая петлевая	>3

Рекомендуются в зависимости от ширины щеток следующие их длины:

$b_щ$, мм	8	10	12,5	16	20	25	32
$l_щ$, мм	10, 12,5	12,5; 16	16; 20	25; 32	25; 32	32	40

Контактная площадь одной щетки, мм²,

$$S_щ = b_щ l_щ. \quad (17\text{-}187)$$

Необходимая контактная площадь всех щеток, мм²,

$$\Sigma S_щ = 2I_2 \cdot 10^2/J_щ, \quad (17\text{-}188)$$

где $J_щ$ — плотность тока под щетками, А/см², не превышающая значений, указанных в табл. 17-20; если двигатель предназначается для режима работы с кратковременными перегрузками, то рекомендуемые в табл. 17-20 значения $J_щ$ уменьшают примерно на 20%.

Количество щеток на одном бракете

$$N_{щ.б} = \Sigma S_щ/2pS_щ. \quad (17\text{-}189)$$

Значение $N_{щ.б}$ округляют до ближайшего целого числа, но для повышения надежности работы узла коллектор — щетки это число должно быть не менее двух, даже если при этом плотность тока под щетками будет значительно ниже допустимой. С этой же целью двигатели с простой волновой обмоткой якоря снабжают полным числом бракетов, хотя такая обмотка работоспособна и при двух бракетах.

Для выбранных значений $N_{щ.б}$ и $b_щ$ уточняют плотность тока под щетками, А/см²,

$$J_щ = 2I_2 \cdot 10^2/2pN_{щ.б}S_щ. \quad (17\text{-}190)$$

Щетки, как правило, располагают в шахматном порядке, так как при этом снижается неравномерность износа коллектора. Активная длина, мм, коллектора при таком расположении щеток

$$l_к = N_{щ.б}(l_щ + 8) + 10. \quad (17\text{-}191)$$

Ширина коллекторной пластины, мм,

$$b_к = t_к - b_и, \quad (17\text{-}192)$$

где $b_и$ — толщина изоляционных прокладок между коллекторными пластинами, равная 0,8 мм для двигателей с высотами оси вращения до 315 мм и 1,0 мм — для двигателей с высотами оси вращения более 315 мм (§ 17-3,б).

17-12. КОММУТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Одним из основных параметров, определяющих коммутационную напряженность машины, является реактивная э. д. с. коммутирующих секций обмотки якоря $e_р$, значение которой должно быть ограничено определенными, установленными практикой пределами.

В обеспечении удовлетворительной коммутации большую роль играет правильный выбор типа обмотки, марки и размеров щеток, размеров и конфигурации наконечника добавочного полюса, конструкции коллектора, траверсы и щеткодержателей. На ухудшение коммутации могут влиять также отклонения в процессе изготовления машин: несимметричное расположение полюсов и щеткодержателей, неудовлетворительное состояние поверхности коллектора и щеток, недостаточное уравновешивание якоря при его балансировке и т. п.

По этим причинам, а также из-за неточности расчетов коммутационных параметров, производимых с некоторыми допущениями, нередко возникает необходимость в настройке коммутации двигателей на испытательном стенде, которая может заключаться в изменении зазора под добавочными полюсами, марки и ширины щеток, а в некоторых случаях — размеров наконечника. Для возможности изменения зазора под добавочными полюсами конструкция двигателей должна предусматривать расположение между станиной и сердечником добавочного полюса прокладок из листовой стали; общая высота прокладок должна быть около 50% расчетного зазора $\delta_д$.

Так как реактивная э. д. с. $e_р$ пропорциональна току I_2, то для ее компенсации э. д. с. $e_к$, индуктируемая в секциях полем добавочных полюсов, также должна быть пропорциональной току I_2. Для соблюдения этого условия добавочные полюсы должны иметь обмотку, соединенную последовательно с обмоткой якоря, и ненасыщенную магнитную систему. Поэтому магнитную индукцию в сердечнике добавочного полюса понижают, а зазор под добавочным полюсом $\delta_д'$ увеличивают в сравнении с главными полюсами. С этой же целью в станине и в спинке якоря на участках, где складываются магнитные потоки главных и добавочных полюсов, суммарная магнитная индукция не должна иметь высоких значений.

Для того чтобы под наконечником добавочного полюса $b_{н.д}$ создавалось коммутирующее поле на протяжении ширины зоны коммутации $b_{з.к}$, значение $b_{н.д}$ принимают, с учетом «распушения» магнитного поля, меньше $b_{з.к}$ на (1,5—3) $\delta_д$.

Расчет коммутационных параметров проводят в следующей последовательности.

Определяют ширину зоны коммутации, мм, при выбранной ширине щетки:

$$b_{з.к} = \left(\frac{b_щ}{t_к} + N_ш - \frac{a}{p} + \varepsilon_к\right) t_к \frac{D_{я2}}{D_к}; \quad (17\text{-}193)$$

при применении раздвижки щеток вместо $b_щ$ в формулу подставляют значение $b'_щ = b_щ + \Delta_р$.

Затем уточняют отношение $k_{з.к} = b_{з.к}/(\tau - b_{п.н})$ и сопоставляют его с предельными значениями, указанными в табл. 17-21. Если $k_{з.к}$ выходит за указанные пределы, то необходимо уменьшить коэффициент полюсной дуги α' с соответствующим изменением длины сердечника и обмотки якоря, либо уменьшить ширину щетки с соблюдением при этом значения плотности тока под щетками $J_щ$ не выше указанного в табл. 17-20.

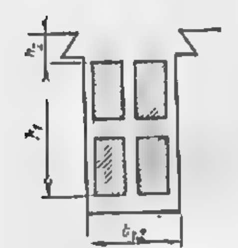


Рис. 17-38. Размеры открытого прямоугольного паза якоря с обмоткой (к определению проводимости рассеяния).

Приведенный коэффициент проводимости рассеяния пазов двигателей с высотами оси вращения до 315 мм включительно:

овального полузакрытого (см. рис. 17-26)

$$\lambda_{п2} = 0,6\frac{h_{п2}}{2r_2} + \frac{h_ш}{b_ш} + \frac{l_{л2}}{l_2} + \frac{2,5\cdot10^6}{w_{c2}l_2A_2v_2}\frac{a}{p}; \qquad (17\text{-}194)$$

прямоугольного открытого (рис. 17-29)

$$\lambda_{п2} = 0,6\frac{h_{п2}}{b_{п2}} + \frac{l_{л2}}{l_2} + \frac{2,5\cdot10^6}{w_{c2}l_2A_2v_2}\frac{a}{p}. \qquad (17\text{-}195)$$

Средний результирующий коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного открытого паза двигателей с высотами оси вращения более 315 мм

$$\lambda'_{п2} = \frac{4\alpha'}{2\gamma''}(\lambda_п + \lambda_з) + \lambda_л\frac{l_{л2}}{l_2}; \qquad (17\text{-}196)$$

здесь $\lambda_п$, $\lambda_з$, $\lambda_л$ — коэффициенты проводимости для потоков рассеяния между стенками пазов, головками зубцов, лобовых частей обмотки якоря соответственно:

$$\lambda_п = 1,25\frac{h_1}{3b} + \frac{h_2}{b},$$

где h_1, h_2, b — по рис. 17-38;

$$\lambda_з = b_{з2макс}/2\delta_д;$$

$\lambda_л$ равен 0,75 при бандажах на лобовых частях из магнитной проволоки и 0,5 при бандажах из стеклоленты или немагнитной проволоки;

$$\gamma'' = b''_щ/t_к,$$

где приведенная ширина щетки, мм,

$$b''_щ = b_щ - b_и + t_к(1 - a/p),$$

$b_и$ — толщина изоляционных прокладок между коллекторными пластинами; если применена раздвижка щеток, то вместо $b_щ$ подставляют

значение $b'_щ = b_щ + \Delta_р$; значение коэффициента $4u'$ определяют по кривых на рис. 17-39, в зависимости от γ'', $\varepsilon_к$ и $N_ш$.

Для двигателей с высотами оси вращения до 315 мм включительно значения $e_р$ определяют по (17-197) с подстановкой приведенного коэффициента проводимости рассеяния паза из (17-194) или (17-195). Последние формулы приближенные, так как не учитывают влияния укорочения шага обмотки, ширины щетки, проводимости рассеяния бандажей лобовых частей обмотки якоря.

Для двигателей с высотами оси вращения 355—500 мм, работающих обычно при более напряженных условиях коммутации, указанные

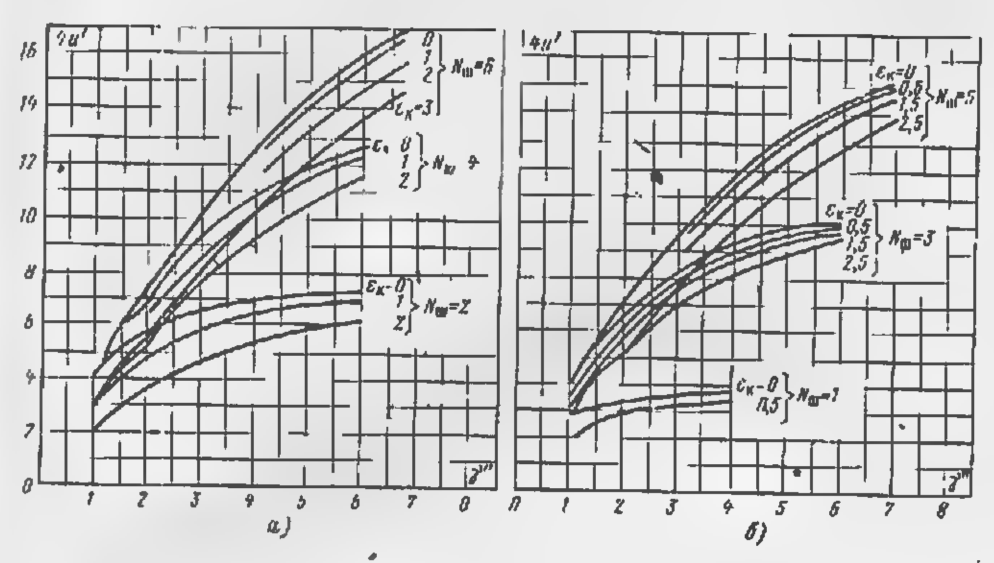


Рис. 17-39. Коэффициент $4u' = f(\gamma'', \varepsilon_к, N_ш)$.
а — $N_ш$=2; 4; 6; б — $N_ш$=1; 3; 5

факторы учитывают введением в (17-197) вместо приведенного коэффициента проводимости рассеяния паза $\lambda_{п2}$ среднего результирующего коэффициента проводимости рассеяния паза $\lambda'_{п2}$ по (17-196).

$$e_р = 2w_{c2}l_2A_2v_2\lambda_{п2}\cdot 10^{-7}. \qquad (17\text{-}197)$$

Значения $e_р$ при наиболее неблагоприятных условиях (максимальной перегрузке и наибольшей частоте вращения при ее регулировании) не должны превышать значений, указанных в таблице.

h, мм	Тип обмотки	Предельные значения $e_р$, В
80—200	Петлевая (при $2p=2$) и волновая (при $2p=4$) с $w_{са}>1$	2,5—3,5
225—315	Волновая	4—5
225—500	Петлевая или лягушечья	8—12

Меньшие значения $e_р$ относятся к быстроходным двигателям ($v_2 \geq 40$ м/с), бо́льшие — к тихоходным.

Среднее значение магнитной индукции в зазоре под добавочным полюсом, Т,

$$B_{\delta д}=\lambda_{в2}A_{я}\cdot 10^{-4}; \qquad (17\text{-}198)$$

для двигателей с высотами оси вращения более 315 мм вместо $\lambda_{в2}$ в (17-198) подставляют $\lambda'_{в2}$.

Необходимый зазор под добавочным полюсом, мм,

$$\delta_{д}=(F_{д}+F_{i}-F_{a})\cdot 10^{4}/0{,}08B_{\delta д}k_{\delta д}, \qquad (17\text{-}199)$$

где $k_{\delta д}$ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние на магнитное сопротивление зазора зубчатого строения сердечника якоря $k_{\delta д2}$, бандажных канавок на сердечнике якоря $k_{б.д}$ и радиальных каналов $k_{к.д}$:

$$k_{\delta д}=k_{\delta д2}k_{б.д}k_{к.д}. \qquad (17\text{-}200)$$

Значения $k_{\delta д2}$ определяют по (17-121), $k_{б.д}$ — по (17-122) или (17-123), $k_{к.д}$ — по (17-124) с подстановкой в эти уравнения вместо δ предварительного значения $\delta_{д}$ из § 17-2.

При несовпадении полученного в (17-199) значения $\delta_{д}$ с предварительно принятым повторяют расчет $k_{\delta д}$ с новым значением $\delta_{д}$ до получения приблизительно одинаковых значений $\delta_{д}$.

Ширина полюсного наконечника, мм:

при отсутствии скоса пазов якоря

$$b_{н.д}=b_{з.к}-(2\div 3)\,\delta_{д}; \qquad (17\text{-}201)$$

при наличии скоса пазов якоря

$$b_{н.д}=b_{з.к}-(1{,}5\div 2)\,\delta_{д}. \qquad (17\text{-}202)$$

Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом, Вб,

$$\Phi_{\delta д}=b_{з.к}l_{н.д}B_{\delta д}\cdot 10^{-6}. \qquad (17\text{-}203)$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса, Вб,

$$\Phi_{д}=\sigma_{д}\Phi_{\delta д}, \qquad (17\text{-}204)$$

где $\sigma_{д}$ — коэффициент магнитного рассеяния добавочного полюса; у двигателей с половинным числом добавочных полюсов ($2p_{д}=p$) $\sigma_{д}\approx 2$, у двигателей с полным числом добавочных полюсов ($2p_{д}=2p$) и без компенсационной обмотки $\sigma_{д}\approx 3\div 3{,}5$, с компенсационной обмоткой $\sigma_{д}\approx 2$.

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при перегрузке, Вб,

$$\Phi'_{д}=\Phi_{д}I_{макс}/I_{н}. \qquad (17\text{-}205)$$

Площадь поперечного сечения сердечника добавочного полюса, мм²,

$$Q_{д}=b_{д}l_{д}k_{с}. \qquad (17\text{-}206)$$

Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса при перегрузке, Т,

$$B_{д}=\Phi'_{д}\cdot 10^{6}/Q_{д}; \qquad (17\text{-}207)$$

полученное значение не должно превышать 1,6 Т; в противном случае увеличивают ширину сердечника полюса $b_{д}$.

Расчетная магнитная индукция на участках станины, в которых суммируются магнитные потоки главных и добавочных полюсов, Т:

$$B'_{c1} = (\sigma\Phi + \Phi'_{д}) \cdot 10^{6}/2Q_{c}; \qquad (17\text{-}208)$$

значение B'_{c1} не должно превышать предельных значений B_{c1}, указанных в § 17-2,б, более чем на 15%.

Расчетная магнитная индукция на участках спинки якоря, в которых суммируются магнитные потоки главных и добавочных полюсов, Т,

$$B'_{c2} = (\Phi + \Phi_{дп}) \cdot 10^{6}/2Q_{c2}; \qquad (17\text{-}209)$$

значение B'_{c2} не должно превышать предельных значений B_{c2}, указанных в табл. 17-13, более чем на 15%.

17-13. НОМИНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Расчетная масса стали зубцов якоря с овальными полузакрытыми пазами, кг,

$$G_{з2} = 7{,}8 Z_2 b_{з2} \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}\right) l_{эф2} \cdot 10^{-6}. \qquad (17\text{-}210)$$

Расчетная масса стали зубцов якоря с прямоугольными открытыми пазами, кг,

$$G_{з2} = 7{,}8 Z_2 b_{з2ср} h_{п2} l_{эф2} \cdot 10^{-6}. \qquad (17\text{-}211)$$

Магнитные потери в зубцах якоря, Вт,

$$P_{з2} = 2{,}3 p_{1,0/50} (f/50)^{\beta} B^{2}_{з2ср} G_{з2}, \qquad (17\text{-}212)$$

где коэффициент 2,3 учитывает влияние технологического процесса изготовления сердечника якоря, а также неравномерности распределения магнитной индукции; $p_{1,0/50}$ — удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Т (табл. 17-22).

Таблица 17-22

Удельные потери $p_{1,0/50}$ и показатель степени β

Марка стали	$p_{1,0/50}$, Вт/кг	β
2013 и 2211	2,5—2,6	1,5
2312	1,75	1,4
2411	1,6	1,3

Частота перемагничивания $f = \frac{pn}{60}$, Гц.

Расчетная масса стали спинки якоря, кг:
при отсутствии аксиальных каналов

$$G_{c2} = 7{,}8 \frac{\pi[(D_{н2} - 2h_{п2})^{2} - D^{2}_{2}]}{4} l_{эф2} \cdot 10^{-6}; \qquad (17\text{-}213)$$

при наличии аксиальных каналов

$$G_{c2}=7{,}8\left\{\frac{\pi\left[(D_{н2}-2h_{п2})^2-D^2_2\right]}{4}-Q_{к2}\right\} l_{эф2}\cdot 10^{-6}, \qquad (17\text{-}214)$$

где $Q_{к2}$ — площадь поперечного сечения всех аксиальных каналов якоря, мм^2.

Магнитные потери в спинке якоря, Вт,

$$P_{c2}=2{,}3p_{1,0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{β}B^2_{c2}G_{c2}. \qquad (17\text{-}215)$$

Для упрощения расчетов $P_{з2}$ и P_{c2} произведение $2{,}3p_{1,0/50}(f/50)^{β}$ в зависимости от частоты перемагничивания и марки стали приведено на рис. 17-40.

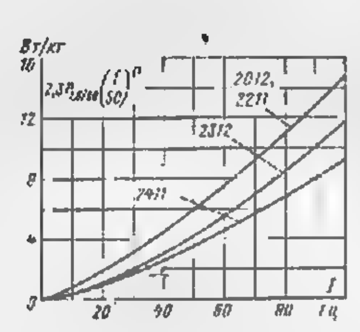


Рис. 17-40. Значения $2{,}3p_{1,0/50}\times(f/50)^{β}=f(f)$ для двигателей постоянного тока.

Суммарные магнитные потери в сердечнике якоря, Вт,

$$\Sigma P_c=P_{з2}+P_{c2}. \qquad (17\text{-}216)$$

Потери на трение щеток о коллектор, Вт,

$$P_{т.щ}\approx 5\Sigma S_{щ}v_к\cdot 10^{-3}. \qquad (17\text{-}217)$$

Потери $P_{т.п}$ на трение в подшипниках и вентиляционные потери $P_{вен}$, Вт, определяют по рис. 17-41,*а—г*.

У двигателей со способами охлаждения IC17, IC37 при $h\leqslant 315$ мм потери на трение подшипников и якоря о воздух можно принимать по данным рис. 17-41,*г*.

Суммарные механические потери, Вт,

$$\Sigma P_{мх}=P'_{т.щ}+P_{т.п}+P_{вен}. \qquad (17\text{-}218)$$

Добавочные потери при номинальной нагрузке, Вт:

у некомпенсированных двигателей

$$P_д=0{,}01\ P_2/\eta; \qquad (17\text{-}219)$$

у компенсированных двигателей

$$P_д=0{,}005\ P_2/\eta, \qquad (17\text{-}220)$$

где η — предварительное значение к. п. д. из рис. 5-3.

Электромагнитная мощность двигателя, Вт,

$$P_{эм}=P_{2н}+\Sigma P_c+\Sigma P_{мх}+P_д. \qquad (17\text{-}221)$$

Для определения E_2, I_2 решают уравнения:

$$P_{эм}=E_2I_2; \qquad (17\text{-}222)$$

$$E_2=U-I_2\Sigma r_2-\Delta U_щ. \qquad (17\text{-}223)$$

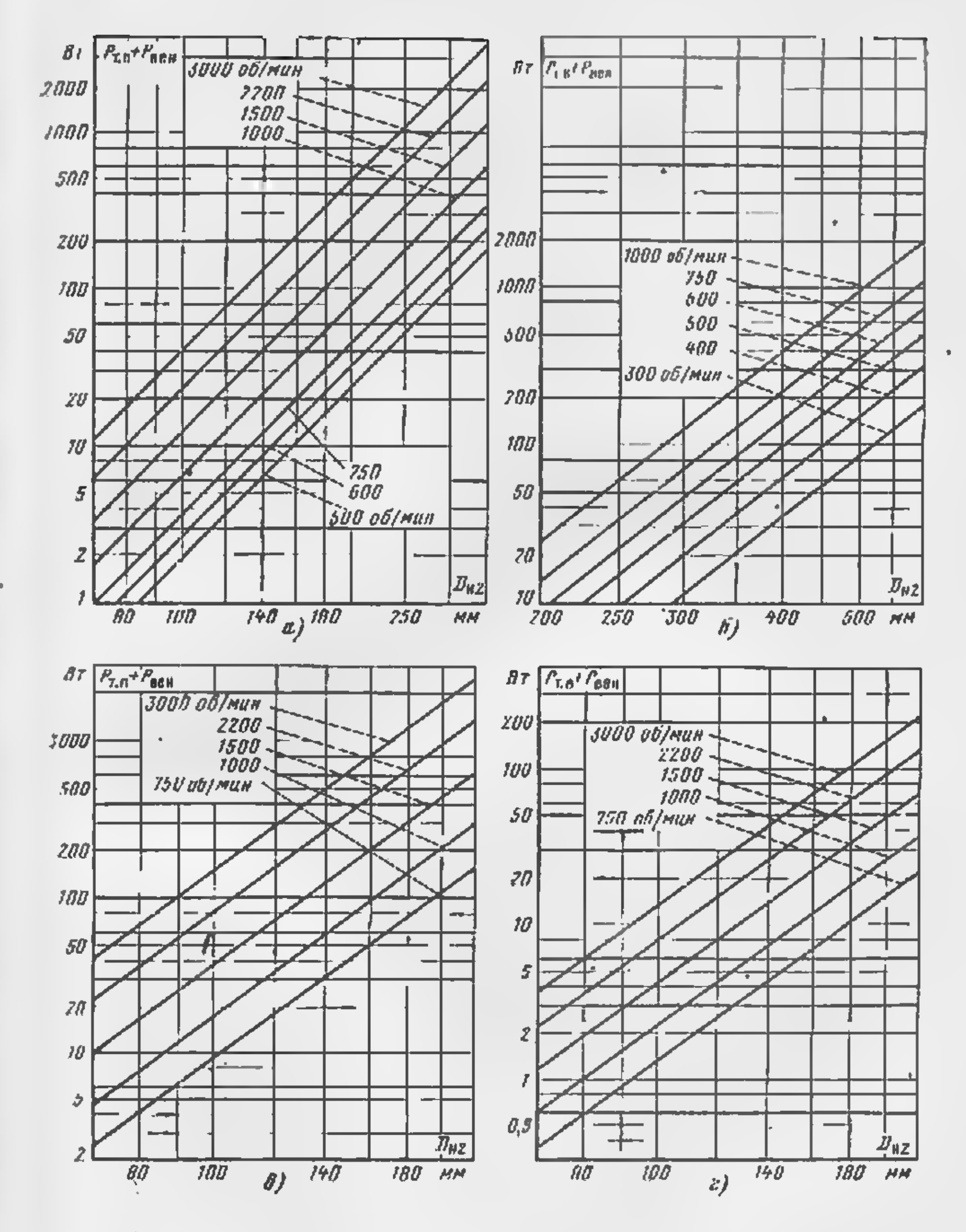


Рис. 17-41. Средние значения потерь $P_{т.п}+P_{вен}=f(D_{н2})$ для двигателей.

а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, б — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17, со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37; в — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141; г — со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0041.

При решении этих уравнений относительно E_2, В, получаем:

$$E_2=\frac{U-\Delta U_{ш}}{2}+\sqrt{\left(\frac{U-\Delta U_{ш}}{2}\right)^2-P_{эм}\Sigma r_2}, \qquad (17\text{-}224)$$

а

$$I_2=P_{эм}/E_2. \qquad (17\text{-}225)$$

Потери в цепи параллельного возбуждения главных полюсов, Вт,

$$P_{м\,ш}=UI_{ш}; \qquad (17\text{-}226)$$

при независимом возбуждении в формулу подставляют значение напряжения независимого возбуждения.

Подводимая мощность двигателя, Вт,

$$P_1=UI_2+P_{м\,ш}. \qquad (17\text{-}227)$$

Суммарные потери в двигателе, Вт,

$$\Sigma P=P_1-P_2. \qquad (17\text{-}228)$$

Коэффициент полезного действия двигателя, %,

$$\eta=(1-\Sigma P/P_1)\cdot 100. \qquad (17\text{-}229)$$

Размагничивающее действие реакции якоря вычисляют по (17-172).

Магнитодвижущая сила последовательной стабилизирующей обмотки, А, из (17-109)

$$F_c=w_c I_2/a_c. \qquad (17\text{-}230)$$

Результирующая м. д. с., А:

у некомпенсированного двигателя

$$\Sigma F=F_{ш}+F_c-F_{р2}; \qquad (17\text{-}231)$$

у компенсированного двигателя

$$\Sigma F\approx F_{ш}+F_c, \qquad (17\text{-}232)$$

где значение $F_{ш}$ принимают из (17-171) или (17-173), а $F_{р2}$ — из (17-172).

По характеристике намагничивания определяют значение магнитного потока Φ, а затем уточняют частоту вращения, об/мин,

$$n=\frac{30E_2}{(p/a)\,w_2\Phi} \qquad (17\text{-}233)$$

с подстановкой в это выражение E_2 из (17-224).

Вращающий момент на валу двигателя, Н·м,

$$M_2=9{,}57\,P_2/n, \qquad (17\text{-}234)$$

где P_2 — мощность на валу, Вт.

Ток двигателя, А,

$$I=I_2+I_{ш}. \qquad (17\text{-}235)$$

Для определения рабочих характеристик двигателя целесообразен следующий порядок расчета.

Задаются значениями kI_2, где $k=0{,}1$; 0,25; 0,5; 0,75; 1,25, а I_2 — ток якоря при номинальной мощности. Вычисляют для каждого значения тока э. д. с. E_2 — по (17-223), $F_{р2}$, F_c — по (17-230), ΣF по (17-231) или (17-232), Φ — по характеристике намагничивания, n — по (17-233), P_1 по (17-227), $P_{ом}$ — по (17-222), ΣP_c, $P_д$, P_2 — по (17-221), ΣP — по (17-228), η — по (17-229), M_2 по (17-234), I — по (17-235). При этом

следует принимать значение F_{p2} (для некомпенсированных двигателей) изменяющимся пропорционально k, $P_{мх}$=const, ΣP_c пропорционально Φ^2, $P_д$ пропорционально k^2. Рабочие характеристики n, M_2, η, I строят в функции P_2.

17-14. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

а) Общие положения

Задачей теплового расчета является определение превышения температуры обмоток якоря, добавочных и главных полюсов, компенсационной обмотки, а также коллектора над температурой охлаждающей среды при продолжительном режиме работы. Эти превышения должны быть ниже предельных допускаемых значений, установленных ГОСТ 183-74, при температуре охлаждающей среды +40°С и высоте над уровнем моря не более 1000 м (см. табл. 5-1).

Приближенная оценка превышения температуры отдельных частей двигателей постоянного тока базируется на тех же принципах и допущениях, которые приняты для теплового расчета асинхронных двигателей (см § 14-14). Тепловой процесс в отдельных частях двигателей постоянного тока можно представить в следующем виде.

Электрические потери, возникающие в пазовой части обмотки якоря, передаются через тепловое сопротивление изоляции проводов и паза сердечнику, а затем, совместно с магнитными потерями, возникающими в стали сердечника — воздуху внутри двигателя через охлаждаемую поверхность сердечника. Электрические потери, возникающие в лобовых частях обмотки якоря, передаются через тепловое сопротивление изоляции и охлаждаемую поверхность лобовых частей воздуху внутри двигателя.

Основная часть электрических потерь, выделяющихся в обмотках возбуждения главных и добавочных полюсов, передается через тепловое сопротивление изоляции и охлаждаемую поверхность катушек воздуху внутри двигателя. Остальная часть потерь проходит через сердечники полюсов и отводится непосредственно в окружающую среду наружной поверхностью станины.

Электрические потери, возникающие в пазовой части компенсационной обмотки, передаются через тепловое сопротивление изоляции обмотки и паза сердечнику полюса. Эти потери, а также добавочные магнитные потери в полюсных наконечниках, отводятся главным образом с поверхности полюсных наконечников воздухом внутри двигателя, а остальная часть потерь передается в окружающую среду через наружную поверхность станины. Электрические потери, возникающие в лобовых частях секционной компенсационной обмотки, передаются через тепловое сопротивление изоляции лобовых частей и охлаждаемую поверхность лобовых частей воздуху внутри двигателя. При стержневой компенсационной обмотке потери в дугах передаются охлаждаемой поверхностью дуг непосредственно воздуху внутри двигателя.

Потери трения и потери в щеточном контакте передаются охлаждаемой поверхностью коллектора, включающей поверхность аксиальных вентиляционных каналов в коллекторе (при их наличии) воздуху внутри двигателя.

Для определения превышения температуры обмоток в наихудших возможных условиях сопротивление обмоток приводят, как у асинхрон-

ных двигателей, к предельной допускаемой температуре (ГОСТ 183-74) при выбранном классе нагревостойкости изоляции; удельная электрическая проводимость γ_ϑ для этих температур указана в табл. 14-34.

Чтобы использовать в тепловом расчете сопротивления обмоток, вычисленные ранее при расчетной рабочей температуре (для определения к. п. д. и рабочих характеристик), их необходимо умножить на коэффициент k_ϑ, равный при классе нагревостойкости изоляция B — 1,15, классе F — 1,07, классе H — 1,145 (см. § 14-14,а). Соответственно

$$P_{м2}=I^2{}_2 k_\vartheta r_2;\quad P_{м.д}=I^2{}_2 k_\vartheta r_д;\quad P_{м.ш}=U^2/k_\vartheta r_ш;$$

$$P_{м.с}=I^2{}_2 k_\vartheta r_с;\quad P_{м.ст1}=I^2{}_2 k_\vartheta r_{с1};\quad P_{м.д1}=I^2{}_2 k_\vartheta r_{д1};\quad P_{м1}=I^2{}_2 k_\vartheta r_1,$$

где $P_{м2}$, $P_{м.д}$, $P_{м.ш}$, $P_{м.с}$, $P_{м.ст1}$, $P_{м.д1}$, $P_{м1}$ — электрические потери соответственно в обмотке якоря, обмотке добавочных полюсов, параллельной или независимой обмотке главных полюсов, последовательной обмотке главных полюсов, стержнях компенсационной обмотки, дугах компенсационной обмотки, секционной обмотке.

Определяемые в тепловом расчете превышения температур при выбранных электромагнитных нагрузках должны быть ниже предельных допускаемых значений не менее чем на 10%.

Для ответственных приводов, требующих повышенной надежности в эксплуатации (для двигателей прокатных станов в металлургической промышленности и др.), допускаемые превышения температуры в некоторых случаях могут быть снижены на одну ступень; например, при применении изоляции класса нагревостойкости F принимают допускаемое превышение температуры, соответствующее классу нагревостойкости B с учетом 10%-ного запаса по превышению температуры.

б) Обмотка якоря

Превышение температуры, °С, охлаждаемой поверхности сердечника якоря над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{п2}=\frac{P_{м2}\,(2l_2/l_{ср2})+\Sigma P_с}{(\pi D_{н2}+n_{к2}d_{к2})\,l_2\,\alpha_2},\qquad(17\text{-}236)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника, Вт/(мм$^2\cdot$°С).

Средние значения α_2 приведены на рис. 17-42.

Перепад температуры, °С, в изоляции пазовой части обмотки якоря

$$\Delta\vartheta_{из}=\frac{P_{м2}\left(\dfrac{2l_2}{l_{ср2}}\right)}{Z_2\Pi_2 l_2}\left(\frac{r_1+r_2}{8\lambda'_{экв}}+\frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right),\qquad(17\text{-}237)$$

где Π_2 — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза якоря, мм:

для овальных полузакрытых пазов

$$\Pi_2=\pi(r_1+r_2)+2h_1;$$

для прямоугольных открытых пазов

$$\Pi_2=2(b_{п2}+h_{п2});$$

$\lambda'_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/(мм$^2\cdot$°С), внутренней изоляции катушки из круглого провода (см. рис. 14-32);

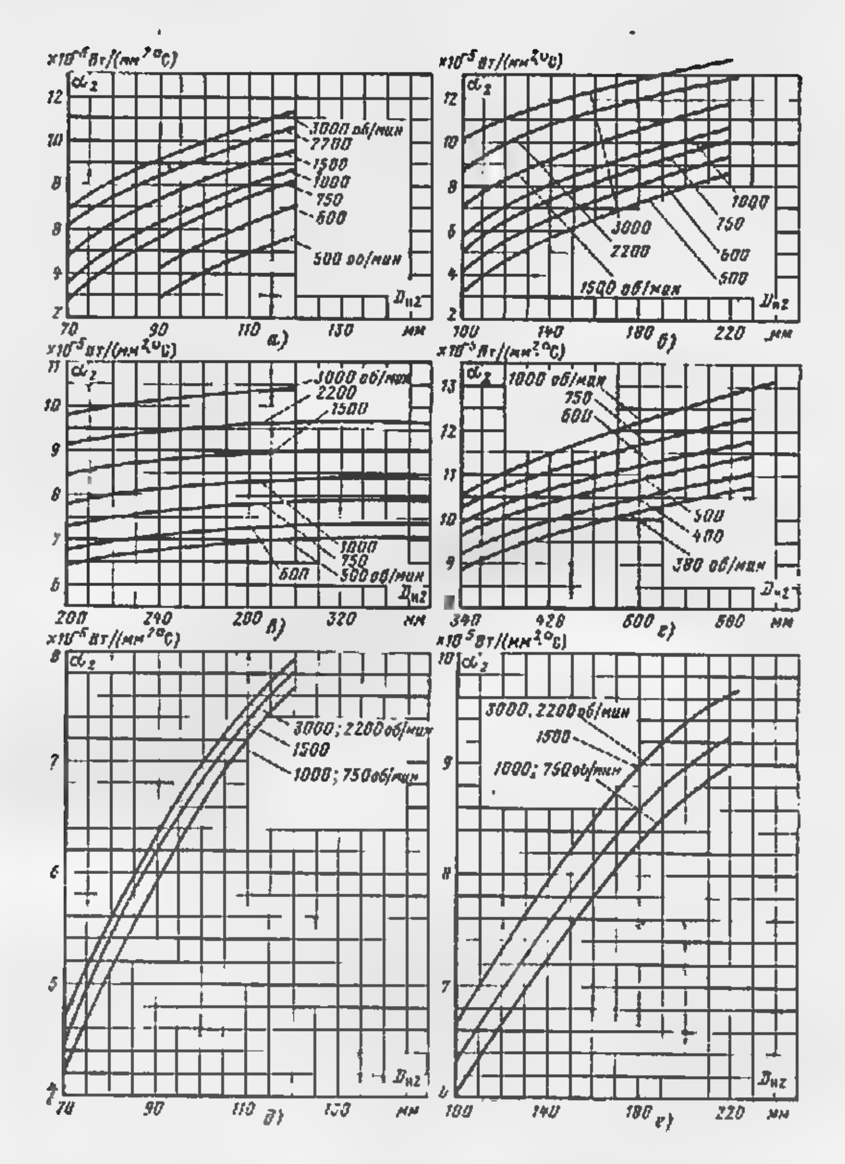


Рис. 17-12. Средние значения $\alpha_2 = f(D_{п2})$ двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, $D_{п2}=70 \div 120$ мм, $2p=2$; *б* — то же, $D_{п2}=100 \div 220$ мм, $2p=4$; *в* — то же, $D_{п2}=200 \div 360$ мм, $2p=4$; *г* — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17; со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37, $D_{п2}=340 \div 600$ мм, $2p=4$; *д* — со степенью защиты IP44 и способами охлаждения IC0041, IC0141, $D_{п2}=70 \div 120$ мм, $2p=2$; *е* — то же, $D_{п2}=100 \div 200$ мм, $2p=4$.

$b_{и2}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу якоря, принимаемая для овальных полузакрытых пазов согласно табл. 17-14, для прямоугольных открытых пазов $b_{и2}=(b_{п2}-N_{ш}b)/2$, мм; $\lambda_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности пазовой изоляции и изоляции лобовых частей, учитывающий воздушные прослойки; для изоляции классов нагревостойкости B, F и H среднее значение $\lambda_{экв}=16\cdot10^{-5}$ Вт/(мм$^2\cdot$°С).

Первый член, указанный в скобках формулы (17-237), представляет собою тепловое сопротивление изоляции круглых проводов в пазовой части всыпной обмотки якоря; для якорных обмоток из жестких секций этот член принимают равным нулю.

Превышение температуры, °С, наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря над температурой воздуха внутри двигателя при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в якоре

$$\Delta\vartheta_{п.л2}=\frac{P_{м2}\,(2l_{л2}/l_{ср2})}{2\pi D_{н2}l_{в2}\alpha_2};\qquad(17\text{-}238)$$

при наличии аксиальных каналов

$$\Delta\vartheta_{п.л2}=\frac{P_{м2}\,(2l_{л2}/l_{ср2})}{4\pi D_{н2}l_{в2}\alpha_2}.\qquad(17\text{-}239)$$

Перепад температуры, °С, в изоляции лобовой части обмотки якоря

$$\Delta\vartheta_{и.л2}=\frac{P_{м2}\dfrac{2l_{л2}}{l_{ср2}}}{2Z_2\Pi_{л2}l_{л2}}\left(\frac{h_{п2}}{8\lambda'_{экв}}+\frac{b_{и.л2}}{\lambda_{экв}}\right),\qquad(17\text{-}240)$$

где $\Pi_{л2}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки, мм:

для овальных полузакрытых пазов

$$\Pi_{л2}=(1+\pi/2)\,(r_1+r_2)+h_1;$$

для прямоугольных открытых пазов

$$\Pi_{л2}\approx2\,(b_{п2}+h_{п2});$$

$b_{и.л2}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части, мм, из табл. 9-12—9-14; для обмоток, не имеющих изоляции в лобовых частях, второй член, указанный в скобках формулы (17-240), равен нулю.

Первый член, указанный в скобках формулы (17-240), рассчитывают только для всыпной обмотки якоря; для якорных обмоток с жесткими секциями этот член равен нулю.

Среднее превышение температуры, °С, обмотки якоря над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta'_2=(\Delta\vartheta_{п2}+\Delta\vartheta_{и2})\frac{2l_2}{l_{ср2}}+(\Delta\vartheta_{п.л2}+\Delta\vartheta_{и.л2})\frac{2l_{л2}}{l_{ср2}}.\qquad(17\text{-}241)$$

При применении изоляции «монолит» (см. § 9-4,ж) значение $\Delta\vartheta'_2$, полученное из (17-241), уменьшается на 20% для двигателей со степенью защиты IP22 и способами охлаждения IC01, IC17, а также для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37.

Среднее превышение температуры, °С, воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_в=\Sigma P'/S_{дв}\alpha_в,\qquad(17\text{-}242)$$

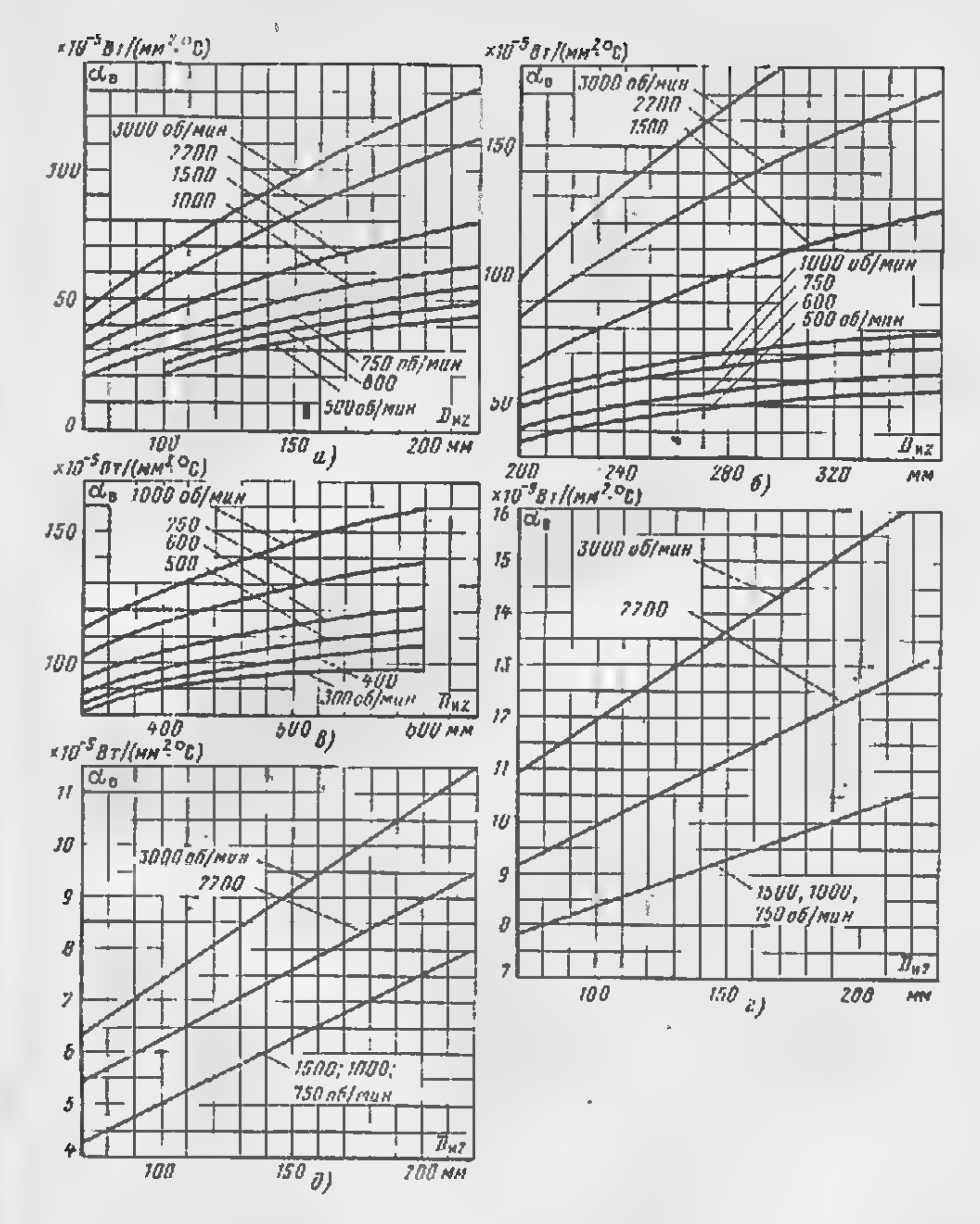


Рис. 17-43. Средние значения $\alpha_в = f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока.

а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, $D_{н2}=70 \div 220$ мм; *б* — то же, $D_{н2}=200 \div 360$ мм; *в* — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17, со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37, $D_{н2}=340 \div 600$ мм; *г* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141, $D_{н2}=70 \div 220$ мм, *д* — со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0041, $D_{н2}=70 \div 220$ мм.

где $\Sigma P'$ — сумма всех потерь за исключением доли потерь в обмотках возбуждения главных и добавочных полюсов, а также в пазовой части компенсационной обмотки, передаваемых непосредственно в окружающую среду через наружную поверхность станины. Эта доля потерь равна $(1-k)(P_{\text{м.ш}}+P_{\text{м.с}}+P_{\text{м.д}}+P_{\text{м1}})$, где k — коэффициент, указанный в табл. 17-23; при секционной компенсационной обмотке вместо $P_{\text{м1}}$ в скобки подставляют $P_{\text{м1}}(2l_{\text{п}}/l_{\text{ср1}})$. У двигателей в исполнении IP44 со способами охлаждения IC0041, IC0141 из значения $\Sigma P'$, кроме того, исключают потери на трение о воздух наружного вентилятора, которые составляют примерно $0{,}9(P_{\text{т.п}}+P_{\text{вен}})$, приведенных на рис. 17-41; $S_{\text{д.в}}$ — условная поверхность охлаждения двигателя, мм²:

$$S_{\text{д.в}} = \pi D_{\text{н1}}(l_2+2l_{\text{в2}}); \qquad (17\text{-}243)$$

$\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент подогрева воздуха, Вт/(мм²·°С); средние значения $\alpha_{\text{в}}$ приведены на рис. 17-43.

Таблица 17-2

Средние значения коэффициента k

Исполнение по степени защиты, способ охлаждения	Коэффициент
IP22, IC01, IP22, IC17, IP44, IC37	0,9
IP44, IC0041	0,7
IP44, IC0141	0,6

Среднее превышение температуры, °С, обмотки якоря над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta'_2 + \Delta\vartheta_{\text{в}}. \qquad (17\text{-}244)$$

в) Обмотка возбуждения главных полюсов

Превышение температуры, °С, наружной поверхности охлаждения многослойной катушки из изолированных проводов обмотки параллельного возбуждения над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{\alpha.\text{ш}} = kP_{\text{м.ш}}/2pS_{\text{ш}}\alpha_1, \qquad (17\text{-}245)$$

где среднее значение коэффициента k — из табл. 17-23; $S_{\text{ш}}$ — условная поверхность охлаждения катушки, мм²:

$$S_{\text{ш}} = l_{\text{ср.ш}}\Pi_{\text{ш}};$$

$\Pi_{\text{ш}}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки, мм. При определении $\Pi_{\text{ш}}$ поверхность катушки, прилегающая к сердечнику полюса, не учитывается; поверхность, прилегающая к изоляционным рамкам, учитывается с коэффициентом 0,3; поверхность в аксиальных каналах секционированных катушек учитывается с коэффициентом 0,5; поверхность охлаждения, соответствующая пунктирной линии, учитывается полностью (рис. 17-44); средние значения $\Pi_{\text{ш}}$ приведены на рис. 17-45; α_1 — коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности охлаждения катушки возбуждения, Вт/(мм²·°С); средние значения α_1 приведены на рис. 17-46.

Перепад температуры, °C, в изоляции катушки

$$\Delta\vartheta_{и.ш}=\frac{kP_{м.ш}}{2pS_{ш}}\left(\frac{b_{к.ш}}{8\lambda'_{экв}}+\frac{b_{и.ш}}{\lambda_{экв}}\right), \qquad (17\text{-}246)$$

где $b_{и.ш}$ — односторонняя толщина наружной изоляции катушки, мм; среднее значение $b_{и.ш}=0{,}2$ мм. Для катушек без наружной изоляции второй член в скобках равен нулю. Для катушек, выполненных из прямоугольных проводов, первый член в скобках принимают равным нулю.

При круглых проводах и пропитке катушки лаком $\lambda'_{экв}$ принимают по рис. 14-32; при компаундировании катушек $\lambda'_{экв}$ увеличивается вдвое, $\lambda_{экв}$, как и для изоляции обмотки якоря, принимают равным $16\cdot10^{-5}$ Вт/(мм²·°C).

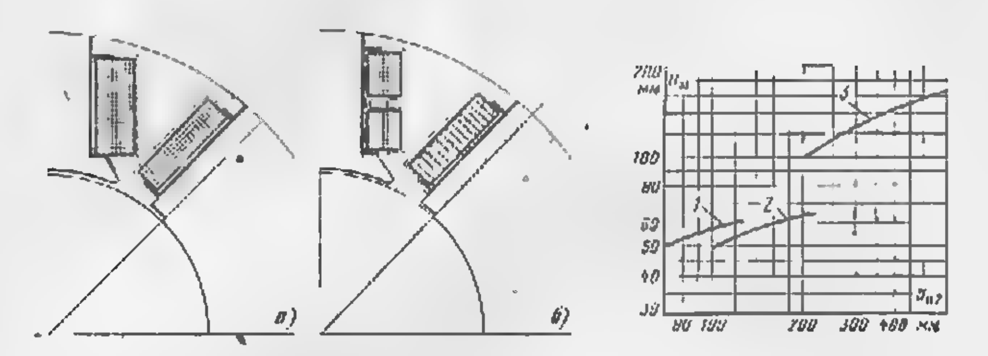


Рис. 17-44. Поверхности охлаждения обмоток возбуждения.

а — обмотки из изолированных проводов, несекционированные; *б* — обмотка главных полюсов секционированная, обмотка добавочных полюсов из неизолированной меди, намотанной на ребро.

Рис. 17-45. Средние значения $П_{ш}=f(D_{я2})$ двигателей постоянного тока.

1 — сплошные катушки, $2p=2$; *2* — то же, $2p=4$; *3* — секционированные катушки, $2p=4$.

Среднее превышение температуры, °C, обмотки возбуждения над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta'_{ш}=\Delta\vartheta_{п.ш}+\Delta\vartheta_{и.ш}. \qquad (17\text{-}247)$$

При применении изоляции «монолит» (см. § 9-4,з) значение $\Delta\vartheta'_{ш}$, полученное из (17-247), уменьшается на 30% для двигателя со степенью защиты IP22 и способами охлаждения IC01, IC17, а также для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды, °C,

$$\Delta\vartheta_{ш}=\Delta\vartheta'_{ш}+\Delta\vartheta_{в}, \qquad (17\text{-}248)$$

где значение $\Delta\vartheta_{в}$ соответствует вычисленному в (17-242).

Тепловой расчет многослойной катушки независимого или последовательного возбуждения главных полюсов проводится аналогично изложенному выше, но с заменой всюду индекса «ш» на «н» (для обмотки независимого возбуждения) или на «с» (для обмотки последовательного возбуждения). Тепловой расчет стабилизирующей последовательной обмотки можно не проводить, если плотность тока в ней приблизительно на том же уровне, что и в обмотке добавочных полюсов.

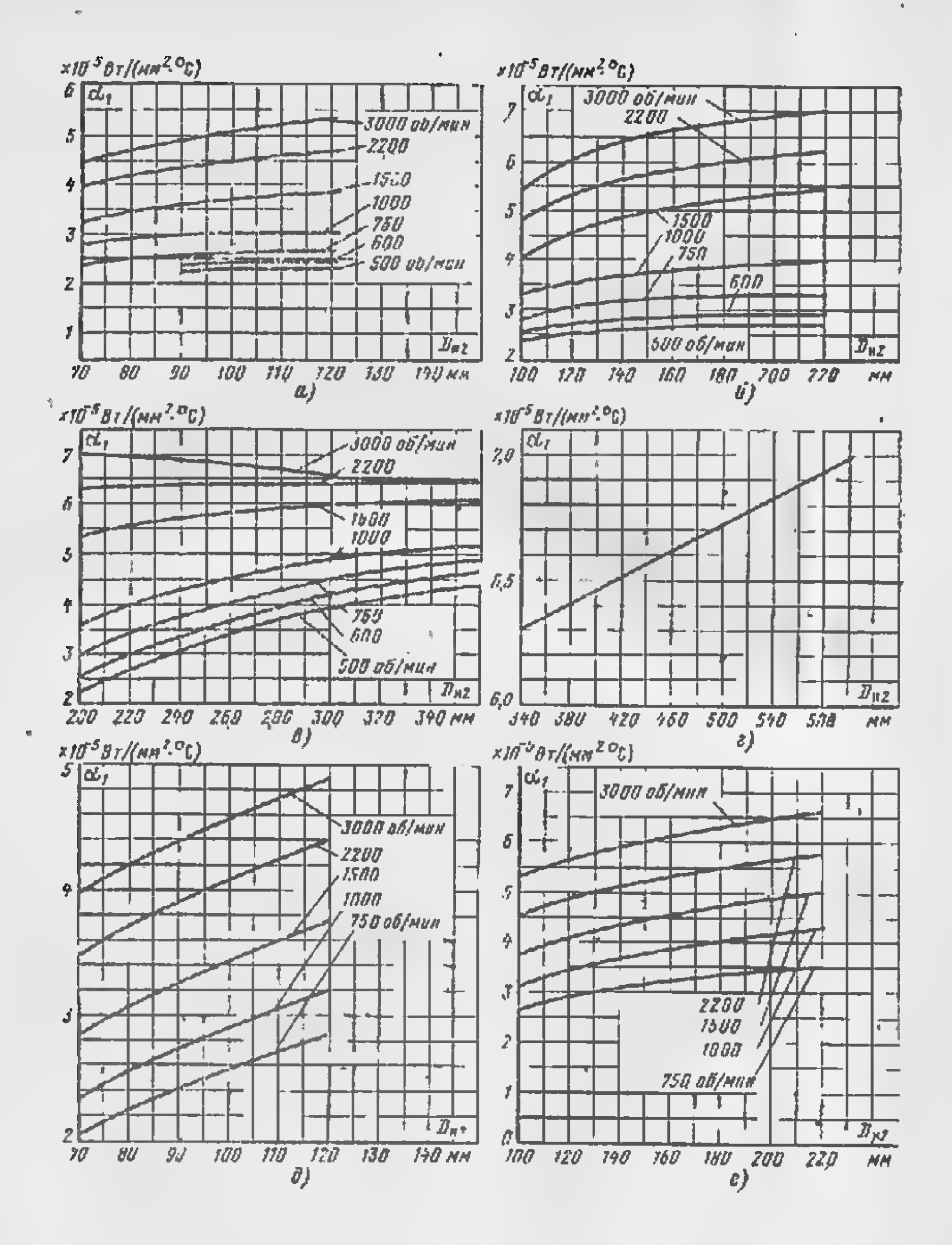


Рис. 17-46. Средние значения $\alpha_1=f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока:
а — со степенью защиты IP22, способом охлаждения IC01, $D_{н2}=70\div120$ мм, $2p=2$; *б* — то же, $D_{н2}=100\div220$ мм, $2p=4$; *в* — то же, $D_{н2}=200\div360$ мм, $2p=4$, *г* — со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC17; со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37, при всех частотах вращения, $D_{н2}=340\div600$ мм; $2p=4$; *д* — со степенью защиты IP44 и способами охлаждения IC0041, IC0141, $D_{н2}=70\div120$ мм, $2p=2$; *е* — то же, $D_{н2}=100\div220$ мм, $2p=4$.

г) Обмотка добавочных полюсов

Превышение температуры, °С, наружной поверхности катушки над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{п.д} = kP_{м.д}/2p_д S_д \alpha_1, \qquad (17\text{-}249)$$

где среднее значение коэффициента k — из табл. 17-23; $S_д$ — условная поверхность охлаждения катушки, мм²; для многослойных катушек из изолированных проводов

$$S_д = l_{ср.д}\Pi_д;$$

$\Pi_д$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки, мм; указания в § 17-14,в относительно определения $\Pi_т$ полностью относятся и к определению периметра $\Pi_д$. Средние значения $\Pi_д$ приведены на рис. 17-47; для однослойных катушек из голых проводов, намотанных на ребро,

$$S_д = l_{ср\,д}(w_д b + 0{,}6\,h).$$

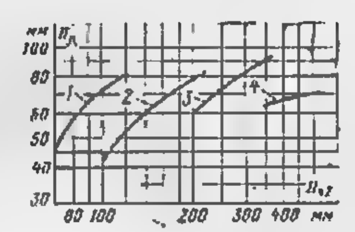


Рис. 17-47. Средние значения $\Pi_д = f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока.

1 — многослойные катушки из изолированных проводов, $2p=2$; 2 — то же, $2p=4$; 3 — однослойные катушки из голой меди, гнутой на ребро, двигателей без компенсационной обмотки, $2p=4$; 4 — то же, двигателей с компенсационной обмоткой, $2p=4$.

Средние значения коэффициента теплоотдачи α_1 наружной поверхности охлаждения катушек добавочных полюсов, выполненных из изолированных проводов, приведены на рис. 17-46. Для катушек, изготовляемых из неизолированной меди, гнутой на ребро — коэффициент α_1 увеличивают у двигателей со способом охлаждения IC01 в исполнении IP22 в 1,5, а у двигателей с независимой вентиляцией в 2 раза.

Перепад температуры, °С, изоляции многослойных катушек из изолированных проводов

$$\Delta\vartheta_{и.д} = \frac{kP_{м.д}}{2p_д S_д}\left(\frac{b_{к.д}}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{и.д}}{\lambda_{экв}}\right), \qquad (17\text{-}250)$$

где $b_{и.д}$ — односторонняя толщина изоляции катушки, мм; среднее значение $b_{и.д} = 0{,}2$ мм; при отсутствии изоляции второй член, указанный в скобках формулы (17-250), принимают равным нулю. Для катушек, выполняемых из прямоугольных проводов, первый член в скобках принимают равным нулю. Значения $\lambda'_{экв}$ и $\lambda_{экв}$ определяют так же, как и для обмоток главных полюсов.

Среднее превышение температуры, °С, обмотки над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta'_д = \Delta\vartheta_{п.д} + \Delta\vartheta_{и.д}. \qquad (17\text{-}251)$$

При применении изоляции «монолит» (см. § 9-4,з) значение $\Delta\vartheta'_д$, полученное по (17-251), уменьшается на 30% для двигателей со степенью защиты IP22 и способами охлаждения IC01, IC17, а также для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC37. Среднее превышение температуры, °С, обмотки над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_д = \Delta\vartheta'_д + \Delta\vartheta_в. \qquad (17\text{-}252)$$

д) Стержневая компенсационная обмотка

Превышение температуры, °С, поверхности полюсного наконечника над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{\text{п1}} = k(P_{\text{м ст}} + P_{\text{с1}})/S_1\alpha'_1, \qquad (17\text{-}253)$$

где среднее значение коэффициента k — из табл. 17-23; α'_1 — коэффициент теплоотдачи поверхности охлаждения компенсационной обмотки. Средние значения α'_1 приведены на рис. 17-48. При самовентиляции α'_1 принимают равным 1,25 α_1 из рис. 17-46. $P_{\text{с1}}$ добавочные магнитные потери, Вт, в полюсных наконечниках, возникающие в результате поперечного колебания магнитного потока,

$$P_{\text{с1}} = k_{\text{п.п}}[(k_{\delta 1} - 1)B_\delta t_1]^2 \left(\frac{Z_2 n}{10^4}\right)^{1,5} \frac{2pb_{\text{н.п}}l_{\text{п}}}{10^6}. \qquad (17\text{-}254)$$

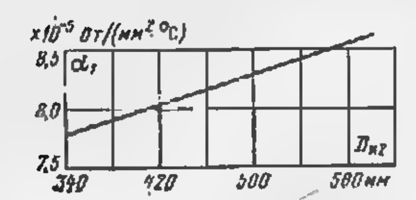


Рис. 17-48. Средние значения $\alpha'_1 = f(D_{н2})$ двигателей постоянного тока со способами охлаждения IC17, IC37 при всех частотах вращения, $D_{н2} = 340 \div 600$ мм, $2p = 4$.

Значения коэффициента $k_{\text{п.п}}$ принимают в зависимости от толщины листов главного полюса:

Толщина листов, мм	0,5	1,0	1,5	2,0
$k_{\text{п.п}}$	1,5	2,8	4,0	5,2

Условную поверхность охлаждения полюсных наконечников S_1, мм^2, можно определить по формуле

$$S_1 = 2pb_{\text{н.п}}l_{\text{п}}.$$

Перепад температуры, °С, в изоляции стержней

$$\Delta\vartheta_{\text{и1}} = \frac{kP_{\text{м.ст1}}}{S_2} \frac{b_{\text{и1}}}{\lambda_{\text{экв}}}, \qquad (17\text{-}255)$$

где S_2 — условная поверхность охлаждения стержней в пазах, мм^2:

$$S_2 = 2pZ_1\Pi_1 l_{\text{п}};$$

Π_1 — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза, мм:

$$\Pi_1 = 2(b_{\text{п1}} + h_{\text{п1}});$$

$b_{\text{и1}}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу, мм:

$$b_{\text{и1}} = (b_{\text{п1}} - N_{\text{ш}}b_{\text{с1}})/2.$$

Среднее превышение температуры, °С, поверхности дуг обмотки над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{\text{д1}} = P_{\text{м д1}}/S_3\alpha'_1, \qquad (17\text{-}256)$$

где S_3 — условная поверхность охлаждения дуг обмотки, мм^2.

$$S_3 = 2pN_1 l_{\text{ср.д1}}(b_{\text{д1}} + h_{\text{д1}}).$$

Среднее превышение температуры, °С, обмотки над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta'_1 = \frac{(\Delta\vartheta_{п1} + \Delta\vartheta_{и1})\, l_{ст1} + \Delta\vartheta_{л1} l_{ср.л1}}{l_{ст1} + l_{ср.л1}}. \tag{17-257}$$

Среднее превышение температуры, °С, обмотки над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_1 + \Delta\vartheta_в. \tag{17-258}$$

е) Секционная компенсационная обмотка

Превышение температуры, °С, поверхности полюсного наконечника над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{п1} = k\frac{P_{м1}\,(2l_п/l_{ср1}) + P_{c1}}{S_1\alpha'_1}, \tag{17-259}$$

где k, P_{c1}, S_1, α'_1, а также упоминаемые ниже значения S_2, $b_{и1}$ определяют так же, как для стержневой компенсационной обмотки.

Перепад температуры, °С, в изоляции пазовой части обмотки

$$\Delta\vartheta_{и1} = k\frac{P_{м1}\,(2l_п/l_{ср1})}{S_2}\,\frac{b_{и1}}{\lambda_{экв}}. \tag{17-260}$$

Превышение температуры, °С, наружной поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{п.л1} = \frac{P_{м1}\,(2l_{л1}/l_{ср1})}{S_3\alpha'_1}, \tag{17-261}$$

где S_3 — условная поверхность охлаждения лобовых частей обмотки, мм²;

$$S_3 \approx 2pZ_1 l_{л1}\,(2b_{п1} + h_{п1}/2).$$

Перепад температуры, °С, в изоляции лобовых частей обмотки

$$\Delta\vartheta_{и.л1} = \frac{P_{м1}\,(2l_{л1}/l_{ср1})}{S_3}\,\frac{b_{и.л1}}{\lambda_{экв}}, \tag{17-262}$$

где $b_{и.л1}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части обмотки, мм (по табл. 9-19 и 9-20)

Среднее превышение температуры, °С, обмотки над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta'_1 = (\Delta\vartheta_{п1} + \Delta\vartheta_{и1})\frac{2l_п}{l_{ср1}} + (\Delta\vartheta_{п.л1} + \Delta\vartheta_{и.л1})\frac{2l_{л1}}{l_{ср1}}. \tag{17-263}$$

Среднее превышение температуры, °С, обмотки над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_1 + \Delta\vartheta_в. \tag{17-264}$$

ж) Коллектор

Превышение температуры, °С, наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta'_{к}=(P_{к.щ}+P_{т.щ})/S_{к}\alpha_{к}, \qquad (17\text{-}265)$$

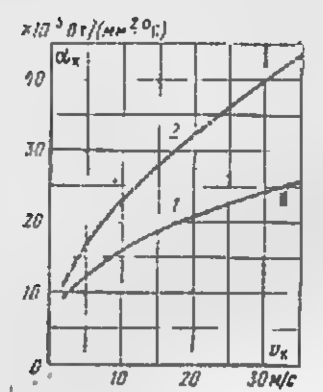


Рис. 17-49. Средние значения $\alpha_к=f(v_к)$ двигателей постоянного тока.
1 — коллекторы без аксиальных каналов; 2 — коллекторы с аксиальными каналами.

где $S_к$ — условная поверхность охлаждения коллектора, мм²;

$$S_к=\pi D_к l_к;$$

$\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности коллектора, Вт/(мм²·°С); средние значения $\alpha_к$ приведены на рис. 17-49.

Превышение температуры, °С, коллектора над температурой охлаждающей среды $\Delta\vartheta_к$ выражается следующими зависимостями:

для двигателей со степенями защиты и способами охлаждения IP22, IC01; IP22; IC17; IP44, IC37: вход охлаждающего воздуха со стороны коллектора

$$\Delta\vartheta_к=\Delta\vartheta'_к; \qquad (17\text{-}266)$$

то же — со входом охлаждающего воздуха со стороны, противоположной коллектору

$$\Delta\vartheta_к=\Delta\vartheta'_к+2\Delta\vartheta_в; \qquad (17\text{-}267)$$

для двигателей со степенями защиты и способами охлаждения IP44, IC0041, IP44, IC0141:

$$\Delta\vartheta_к=\Delta\vartheta'_к+\Delta\vartheta_в. \qquad (17\text{-}268)$$

17-15. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИИ

Вентиляционный расчет двигателей с аксиальной системой самовентиляции или независимой вентиляцией включает в себя определение расхода воздуха, необходимого для охлаждения двигателя, и напора вентилятора, обеспечивающего этот расход воздуха. Для двигателей с самовентиляцией, кроме того, определяют основные размеры вентилятора.

а) Самовентиляция

Необходимое количество охлаждающего воздуха $Q_в$ для двигателей в исполнении IP22 и со способом охлаждения IC01, м³/с,

$$Q_в=\Sigma P'/1100\Delta\vartheta'_в; \qquad (17\text{-}269)$$

$\Delta\vartheta'_в$ — превышение температуры выходящего из двигателя воздуха над температурой входящего, °С; $\Delta\vartheta'_в\approx2\Delta\vartheta_в$, где $\Delta\vartheta_в$ — среднее превышение температуры воздуха в двигателе, определяемое при тепловом расчете в § 17-14.

С достаточным приближением характеристику вентиляционного тракта машины, выражающую связь между потерями напора H, Па,

и расходом воздуха $Q_в$ в тракте, м³/с, можно выразить следующим образом:

$$H=ZQ^2_в, \qquad (17\text{-}270)$$

где Z, Н·с²/м⁸ — постоянная, зависящая от размеров и конструкции вентиляционного тракта двигателя. По аналогии с электрической цепью ее называют эквивалентным аэродинамическим сопротивлением

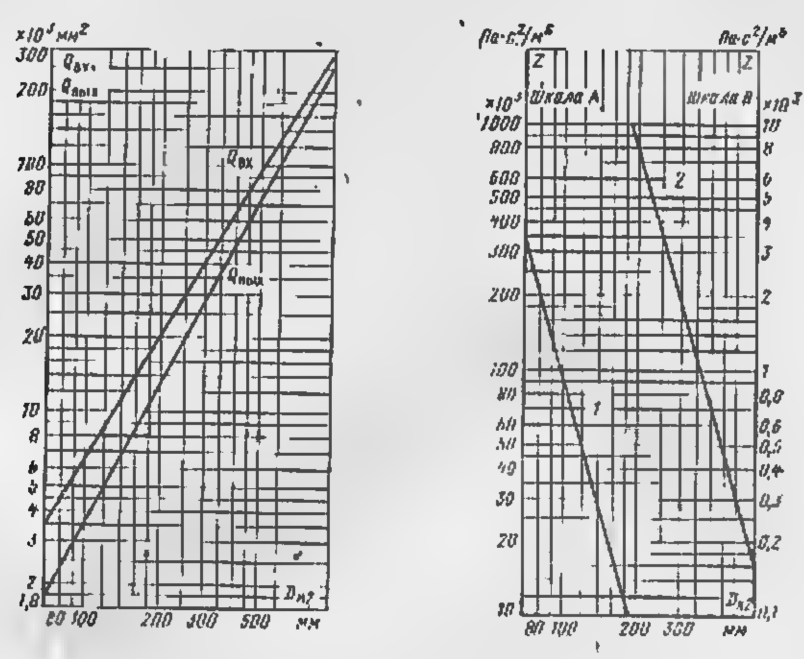


Рис. 17-50. $Q_{вх}$ и $Q_{вых}=f(D_{н2})$.

Рис. 17-51. Средние значения $Z=f(D_{н2})$.
1 — якорь без аксиальных вентиляционных каналов (шкала А); 2 — якорь с аксиальными вентиляционными каналами (шкала В).

тракта двигателя. Расчет этого сопротивления достаточно трудоемок и точное его определение затруднительно, поэтому при проектировании серии двигателей целесообразно ограничиться упрощенным расчетом.

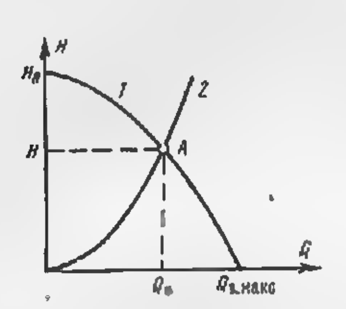
Учитывая, что площади поперечного сечения отверстий для входа $Q_{вх}$ и выхода $Q_{вых}$ воздуха в двигателе в значительной мере определяют значение Z, рекомендуется при проектировании обеспечивать значения этих площадей согласно рис. 17-50. Средние значения $Z=f(D_{н2})$, соответствующие рекомендациям по выбору $Q_{вх}$ и $Q_{вых}$, а также указанным в табл. 17-8 числам и диаметрам аксиальных каналов, приведены на рис. 17-51. Они основаны на данных значительного количества спроектированных и испытанных двигателей. При этом принимается, что изменение длины сердечника якоря при неизменном его диаметре и сохранении площадей поперечного сечения отверстий для входа и выхода воздуха в двигателе незначительно отражается на Z.

Напор, а следовательно, и расход воздуха (при $Z=\text{const}$) зависят от основных размеров вентилятора.

Для двигателей с аксиальной системой вентиляции, как правило, применяют центробежные вентиляторы. Для реверсивных двигателей лопатки вентилятора располагают радиально; аэродинамическая характеристика таких вентиляторов может быть с достаточной степенью точности выражена следующим образом:

$$H = H_0 [1 - (Q_в/Q_{в\,макс})^2]; \qquad (17\text{-}271)$$

здесь H_0 — напор вентилятора при $Q_в = 0$, т. е. при закрытых входных отверстиях, Па; $Q_{в\,макс}$ — максимальное возможное для вентилятора количество воздуха, м³/с, при $H = 0$, т. е. при работе вентилятора непосредственно в окружающую среду.



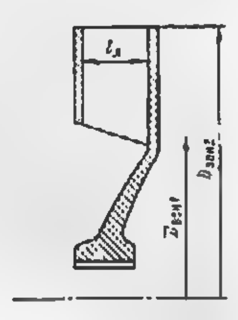


Рис. 17-52. Характеристики вентилятора (1) и вентиляционного тракта двигателя (2).

Рис. 17-53. Размеры центробежного вентилятора.

На рис. 17-52 представлено графическое определение действительного расхода воздуха $Q_в$ и напора вентилятора H по точке пересечения A характеристик вентиляционного тракта и вентилятора.

Для аналитического определения координат точки A приравнивают правые части (17-270) и (17-271) и, решая уравнение, определяют действительный расход воздуха, м³/с,

$$Q_в = Q_{в.макс} \sqrt{H_0/(H_0 + ZQ^2_{в.макс})} \qquad (17\text{-}272)$$

и действительный напор, Па,

$$H = H_0 ZQ^2_{в.макс}/(H_0 + ZQ^2_{в.макс}). \qquad (17\text{-}273)$$

Значения H_0 и $Q_{в\,макс}$ определяются при заданной частоте вращения основными размерами вентилятора. Приведенные ниже в методике расчета эмпирические формулы для выбора этих размеров основаны на опыте разработок значительного количества двигателей.

Расчет вентиляции и выбор размеров вентилятора производят исходя из расхода воздуха, необходимого для охлаждения наиболее длинного двигателя, спроектированного на данном диаметре якоря; с целью унификации тот же вентилятор применяют и для более коротких двигателей с тем же диаметром якоря. При этом, конечно, расход воздуха у коротких двигателей будет несколько выше необходимого для их охлаждения.

Наружный диаметр лопаток центробежного вентилятора (рис. 17-53), мм:

двигателей без аксиальных вентиляционных каналов

$$D_{вен2} \approx (0{,}85 \div 0{,}9) D_1; \qquad (17\text{-}274)$$

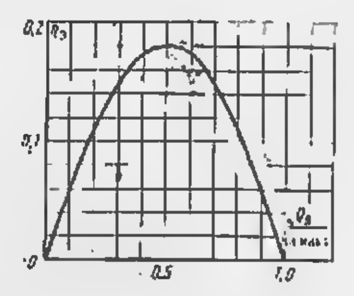
двигателей с аксиальными вентиляционными каналами

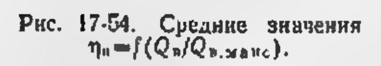
$$D_{вен2} \approx (0{,}8 \div 0{,}9) D_1. \qquad (17\text{-}275)$$

Значения $D_{вен2}$ округляют до ближайшего целого числа. Внутренний диаметр лопаток центробежного вентилятора, мм:

двигателей без аксиальных вентиляционных каналов

$$D_{вен1} \approx 1{,}25\, D_{н2}; \qquad (17\text{-}276)$$




Рис. 17-54. Средние значения $\eta_a = f(Q_в/Q_{в.макс})$.

двигателей с аксиальными вентиляционными каналами

$$D_{вен1} \approx 1{,}15\, D_{н2}. \qquad (17\text{-}277)$$

Полученные значения $D_{вен1}$ округляют до ближайшего целого числа.

Длина лопатки вентилятора, мм,

$$l_л \approx 0{,}15\, D_{вен2}. \qquad (17\text{-}278)$$

Число лопаток вентилятора

$$N_л = D_{вен2}/20. \qquad (17\text{-}279)$$

Значение $N_л$ округляют до ближайшего простого числа.

Напор при $Q_в = 0$, Па,

$$H_0 = \eta_{a0} \gamma (v^2_{вен2} - v^2_{вен1}), \qquad (17\text{-}280)$$

где η_{a0} — аэродинамический к. п. д. при $Q_в = 0$ — можно принимать равным 0,6 для вентиляторов с радиальными лопатками; γ — плотность воздуха, равная 1,23 кг/м³; $v_{вен2}$ и $v_{вен1}$ — окружные скорости по наружному и внутреннему диаметрам лопаток вентилятора, м/с;

$$v_{вен2} = \pi D_{вен2} n_1 / 6 \cdot 10^4;$$

$$v_{вен1} = \pi D_{вен1} n_1 / 6 \cdot 10^4.$$

Максимальный расход воздуха, обеспечиваемый вентилятором с радиальными лопатками, м³/с,

$$Q_{в.макс} = 0{,}42 v_{вен2} Q_{вен}, \qquad (17\text{-}281)$$

где $Q_{вен}$ — площадь входного поперечного сечения вентилятора, м²:

$$Q_{вен} = 0{,}92\, \pi D_{вен2} l_л \cdot 10^{-6}.$$

Действительный расход воздуха, определяемый по (17-272), должен быть не менее $Q_в$, вычисленного по (17-269). Если значение $Q_в$ мало, то можно увеличить H_0 путем некоторого увеличения $D_{вен2}$ и уменьшения $D_{вен1}$.

Действительный напор определяют по (17-273).

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт,

$$P_{вен}=HQ_в/\eta_в, \quad (17\text{-}282)$$

где $\eta_в$ энергетический к. п. д. вентилятора; средние значения $\eta_в$ приведены на рис. 17-54.

При изменении частоты вращения $Q_в$ и $Q_{в.макс}$ изменяются пропорционально n, напор пропорционально n^2, мощность, потребляемая вентилятором, пропорционально n^3.

б) Независимая вентиляция

Количество воздуха, которое должно быть обеспечено независимой вентиляцией, м³/с,

$$Q_в=q_в\Sigma P'\cdot 10^{-3}, \quad (17\text{-}283)$$

где $q_в$ — количество воздуха, приходящееся на 1 кВт потерь; средние значения $q_в$ находятся в пределах 0,04 — 0,045 м³/(с·кВт).

Требуемый напор, Па,

$$H=ZQ^2_в, \quad (17\text{-}284)$$

где Z — из рис. 17-51.

17-16. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Регулирование частоты вращения вверх от номинальной путем уменьшения тока возбуждения обычно производится при постоянной мощности на валу. Пренебрегая изменением к. п. д., при повышении частоты вращения принимают значения I_2 и E_2 такими же, как при номинальном режиме работы. Тогда магнитный поток, соответствующий максимальной частоте вращения $n_{макс}$, Вб,

$$\Phi_{мин}=\Phi n_н/n_{макс}. \quad (17\text{-}285)$$

Определяем по характеристике намагничивания машины м. д. с. $F_{мин}$, соответствующую $\Phi_{мин}$, затем, пренебрегая размагничивающим действием реакции якоря, рассчитываем м. д. с. и ток параллельной обмотки возбуждения, А:

$$F_{ш.мин}=\Sigma F_{мин}-F_c; \quad (17\text{-}286)$$

$$I_{ш.мин}=F_{ш.мин}/w_ш. \quad (17\text{-}287)$$

Максимальное значение регулируемого сопротивления, включаемого в цепь параллельной обмотки возбуждения, Ом,

$$r_р=1{,}3(U/I_{ш.мин}-r_ш). \quad (17\text{-}288)$$

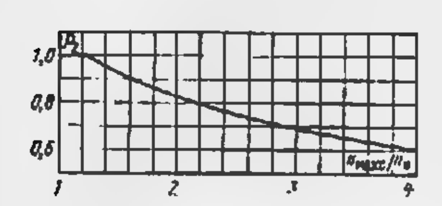
Для регулируемых таким образом двигателей механический расчет вала двигателя (§ 9-1) и определение реактивной э. д. с. $e_р$ по (17-797) производятся для $n_{макс}$.

При регулировании частоты вращения свыше 1 : 1,25 у двигателей, питаемых от тиристорных преобразователей с коэффициентом пульсации напряжения более 1,1, допустимая мощность понижается в сравнении с номинальной согласно рис. 17-55.

Регулирование частоты вращения вниз от номинальной путем уменьшения напряжения на якоре может производиться при постоян-

ном моменте, если со снижением частоты вращения не ухудшается эффект охлаждения двигателя, что может быть обеспечено только при независимой вентиляции. В этом случае значения Ф и I_2 при регулировании частоты вращения остаются такими же, как при номинальном режиме работы.

Если двигатель выполняется с самовентиляцией, то из-за ухудшения эффекта охлаждения при понижении частоты вращения требуется, начиная с некоторого значения n (обычно около $0{,}8\,n_н$) понижать как ток возбуждения, так и ток якоря, что в свою очередь уменьшает допустимое значение момента на валу M_2. Средние значения снижения



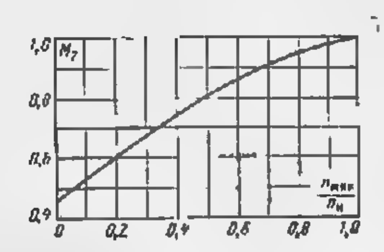


Рис. 17-55. Допустимая мощность двигателя $P_2 = f(n_{макс}/n_н)$.

Рис. 17-56. Допустимый момент вращения двигателя $M_2 = f(n_{мин}/n_н)$ при самовентиляции.

M_2 в зависимости от n для двигателей со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01 приведены на рис. 17-56. Приближенно можно принять, что при этом I_2 и Ф снижаются пропорционально $\sqrt{M_2}$. Реактивная э. д. с. при понижении частоты вращения не определяется, так как она будет заведомо ниже, чем при номинальном режиме работы.

Напряжение на якоре, соответствующее $n_{мин}$, В,

$$U_{мин} = E_2 + I_2 \Sigma r_2 + \Delta U_{щ}, \tag{17-289}$$

где

$$E_{2мин} = \frac{\Phi (p/a)\, n\omega_2}{30}.$$

17-17. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Двигатели постоянного тока находят широкое применение в современных быстродействующих регулируемых системах, для которых особое значение имеют динамические характеристики двигателей. В этих случаях, а также для расчета переходных процессов необходимо определение динамических параметров, к которым относятся динамический момент инерции якоря J, электромеханическая постоянная времени двигателя $T_м$, электромагнитные постоянные времени обмоток якорной цепи и возбуждения.

Динамический момент инерции якоря, кг·м², может быть приближенно определен по формуле

$$J \approx 0{,}67 D^4_{н2} (l_2 + 0{,}3 D_{н2} + 0{,}75 P_2) \cdot 10^{-12}, \tag{17-290}$$

где P_2 — полезная мощность, кВт.

Электромеханическая постоянная времени двигателя, с,

$$T_{м}=\frac{J\Sigma r_2}{91\,(E_2/n)}, \tag{17-291}$$

где значения E_2 и n соответствуют номинальному режиму работы.

Электромагнитная постоянная времени обмоток якорной цепи, с,

$$T_{э2}=L_2/\Sigma r_2. \tag{17-292}$$

Приближенное значение индуктивности обмоток якорной цепи, Г,

$$L_2=k\,\frac{U}{I_2}\,\frac{30}{\pi n p}, \tag{17-293}$$

где коэффициент k принимают равным 0,6 для некомпенсированных и 0,15 для компенсированных двигателей; значения U, I_2 и n соответствуют номинальному режиму работы.

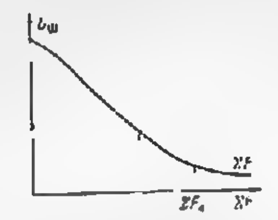


Рис. 17-57. Кривая $L_{ш}=f(\Sigma F)$

Электромагнитная постоянная времени параллельной или независимой обмоток возбуждения, с,

$$T_{э1}=L_{ш}/r_{ш}. \tag{17-294}$$

Индуктивность обмотки возбуждения зависит от тока, протекающего по обмотке, и потока рассеяния, Г:

$$L_{ш}=2pw^2_{ш}\left[\frac{d\Phi}{d\Sigma F}+\frac{\Phi(\sigma-1)}{F_{ш}}\right], \tag{17-295}$$

где значения Φ и $F_{ш}$, подставляемые во второй член заключенный в скобки, соответствуют номинальному режиму работы двигателя.

Значение $d\Phi/d\Sigma F$ определяют для ряда точек характеристики намагничивания двигателя. Для этого проводят касательные к соответствующим точкам характеристики и находят $d\Phi/d\Sigma F$ как тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс либо заменяют бесконечно малые приращения конечными и находят отношения приращения $\Delta\Phi/\Delta\Sigma F$. На основе этого расчета строится зависимость $L_{ш}=f(\Sigma F)$, примерный вид которой показан на рис. 17-57.

17-18. МАССА ДВИГАТЕЛЕЙ

Уточненную массу отдельных деталей, сборочных единиц, а также двигателя в целом следует вычислять после окончания проектирования по разработанным чертежам. Предварительно для оценки экономической эффективности спроектированного варианта массу двигателя определяют приближенно по формулам, приведенным ниже. При этом массу изоляционных, а также конструкционных материалов, входящих во многочисленные детали и узлы двигателей постоянного тока при широкой номенклатуре этих материалов, определяют в приближенном расчете для двигателя в целом.

Масса изолированных проводов обмотки якоря, кг:
круглого поперечного сечения

$$G_{м2}=[7{,}55+1{,}35\,(d'/d)^2]\,w_2 l_{ср2} cq\cdot 10^{-6};\qquad (17\text{-}296)$$

прямоугольного поперечного сечения

$$G_{м2}=(7{,}55+1{,}35\,q'/q)\,w_2 l_{ср2} cq\cdot 10^{-6},\qquad (17\text{-}297)$$

где $q'=h'b'$.

Масса неизолированных проводов обмотки якоря, кг,

$$G_{м2}=8{,}9\,w_2 l_{ср2} cq\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}298)$$

Масса изолированных проводов обмотки возбуждения главных полюсов, кг:

круглого поперечного сечения

$$G_{м.ш}=[7{,}55+1{,}35(d'/d)^2]\,2pw_{ш} l_{ср.ш} q_{ш}\cdot 10^{-6};\qquad (17\text{-}299)$$

прямоугольного поперечного сечения

$$G_{м.ш}=(7{,}55+1{,}35q'/q)\,2pw_{ш} l_{ср.ш} q_{ш}\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}300)$$

Масса изолированных проводов обмотки добавочных полюсов, кг:
круглого поперечного сечения

$$G_{м.д}=[7{,}55+1{,}35\,(d'/d)^2]\,2p_{д} w_{д} l_{ср.д} q_{д}\cdot 10^{-6};\qquad (17\text{-}301)$$

прямоугольного поперечного сечения

$$G_{м.д}=(7{,}55+1{,}35q'/q)\,2p_{д} w_{д} l_{ср.д} q_{д}\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}302)$$

Масса неизолированных проводов обмотки добавочных полюсов, кг,

$$G_{м.д}=8{,}9\cdot 2p_{д} w_{д} l_{ср.д} q_{д}\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}303)$$

Масса изолированных проводов последовательной обмотки возбуждения, кг:

круглого поперечного сечения

$$G_{м.с}=[7{,}55+1{,}35(d'/d)^2]\,2pw_{с} l_{ср.с} q_{с}\cdot 10^{-6};\qquad (17\text{-}304)$$

прямоугольного поперечного сечения

$$G_{м.с}=(7{,}55+1{,}35q'/q)\,2pw_{с} l_{ср.с} q_{с}\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}305)$$

Масса неизолированных проводов последовательной обмотки возбуждения, кг,

$$G_{м.с}=8{,}9\cdot 2pw_{с} l_{ср.с} q_{с}\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}306)$$

Масса неизолированных проводов стержневой компенсационной обмотки, кг,

$$G_{м1}=8{,}9\cdot 2pN_1\,(l_{ст1} q_{ст1}+l_{ср.д1} q_{д1})\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}307)$$

Масса неизолированных проводов секционной компенсационной обмотки, кг,

$$G_{м1}=8{,}9\cdot 2\,pw_1 l_{ср1} cq_1\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}308)$$

Масса коллекторной меди, кг,

$$G_{м.к}=5{,}25D_{к}^{1{,}5} l_{к}\cdot 10^{-6}.\qquad (17\text{-}309)$$

Суммарная масса проводов обмоток и коллекторной меди, кг,

$$\Sigma G_м = G_{м2} + G_{м\,п} + G_{м.д} + G_{м.с} + G_{м1} + G_{м.к}. \quad (17\text{-}310)$$

Массу стали зубцов сердечника якоря $G_{з2}$ определяем по (17-210) или (17-211); массу стали спинки сердечника якоря G_{c2} — по (17-213) или (17-214).

Масса стали сердечников главных полюсов, кг:

двигателей без компенсационной обмотки

$$G_п \approx 8{,}5 \cdot 2pl_{эф\,п} b_п h_п \cdot 10^{-6}; \quad (17\text{-}311)$$

двигателей с компенсационной обмоткой

$$G_п \approx 7{,}8 \cdot 2pl_{эф.п} (1{,}15 b_п h_п - Z_1 Q_{п1}) \cdot 10^{-6}. \quad (17\text{-}312)$$

Масса стали сердечников добавочных полюсов, кг:

массивных

$$G_д \approx 7{,}8 \cdot 2p_д l_д b_д h_д \cdot 10^{-6}; \quad (17\text{-}313)$$

шихтованных

$$G_д \approx 7{,}8 \cdot 2p_д k_c l_д b_д h_д \cdot 10^{-6}. \quad (17\text{-}314)$$

Масса станины, кг:

массивной

$$G_{c1} = 6{,}05 l_1 (D^2_{н1} - D^2_1) \cdot 10^{-6}; \quad (17\text{-}315)$$

шихтованной

$$G_{c1} = 6{,}45 k_c l_1 (D^2_{н1} - D^2_1) \cdot 10^{-6}. \quad (17\text{-}316)$$

Суммарная масса активной стали, кг,

$$\Sigma G_c = G_{з2} + G_{c2} + G_п + G_д + G_{c1}. \quad (17\text{-}317)$$

Масса изоляции двигателя, кг,

$$G_и = (3{,}8 D^{1,5}_{н1} + 0{,}2 D_{н1} l_1) \cdot 10^{-4}. \quad (17\text{-}318)$$

Предварительно для приближенной оценки массы конструкционных материалов могут быть приняты следующие зависимости:

для двигателей в исполнении IP22 и IP44 с естественным охлаждением (IC0041)

с высотами оси вращения до 200 мм

$$G_к = [0{,}7 D^2_{н1} l_1 + 0{,}9 D^3_{н1}] \cdot 10^{-6}; \quad (17\text{-}319)$$

с высотами оси вращения 225—315 мм

$$G_к = [0{,}8 D^2_{н1} l_1 + 1{,}1 D^3_{н1}] \cdot 10^{-6}; \quad (17\text{-}320)$$

для двигателей в исполнении IP44 с наружным обдувом (IC0141)

$$G_к = [0{,}7 D^2_{н1} l_1 + 1{,}1 D^3_{н1}] \cdot 10^{-6}. \quad (17\text{-}321)$$

Для двигателей с независимой вентиляцией (IC17, IC37) и высотами оси вращения более 315 мм, предназначенных для относительно тяжелых условий работы, масса конструкционных материалов, кг,

$$G_к = [0{,}9 D^2_{н1} l_1 + 1{,}2 D^3_{н1}] \cdot 10^{-6}. \quad (17\text{-}322)$$

Масса двигателя, кг,

$$G_{дв} = \Sigma G_м + \Sigma G_c + G_и + G_к. \quad (17\text{-}323)$$

Глава восемнадцатая

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Техническое задание на проектирование участков серии удобно представить в виде табл. 18-1.

Таблица 18-1

Техническое задание на проектирование участков серии двигателей постоянного тока

Наименование	Условное обозначение участка серии		
	№ 1	№ 2	№ 3
Диапазон мощностей, кВт	4—11*	37—110*	200, 320**
Номинальные частоты вращения, об/мин	3000, 2200, 1500	2200, 1500, 1000	500, 400, 300
Ориентировочные высоты оси вращения, мм	132, 160	225, 250, 280	450, 500
Номинальное напряжение, В	220	220	440
Диапазон регулирования частоты вращения вверх ослаблением поля главных полюсов	1:2*	1:1,5*	1:4**
Диапазон регулирования частоты вращения вниз напряжением на якоре	3:1*	5:1*	10:1**
Класс изоляции по нагревостойкости (с использованием по нагреву)	B	F	F
Род возбуждения	Параллельное со стабилизирующей последовательной обмоткой		Независимое, напряжение 440 В
Степень защиты (ГОСТ 17494-72)	IP22		IP44
Способ охлаждения (ГОСТ 20459-75)	Аксиальная самовентиляция IC01		Независимая вентиляция по трубам IC37
Назначение	Общее		Для тяжелых условий работы
Дополнительные требования	—	—	Компенсационная обмотка

* При $n_н = 1500$ об/мин. ** При $n_н = 500$ об/мин.

Общие требования ко всем участкам серии:

1. Номинальный режим работы — продолжительный (S1) по ГОСТ 183-74.

2. Значение к. п. д. при номинальном режиме должно приближаться к данным рис. 5-3. При коэффициенте загрузки 0,6 к. п. д. не должен снижаться более чем на 1 %.

3. Шкала мощностей твердая согласно ГОСТ 12139-74 для всех частот вращения.

4. Исполнение по форме монтажа — М101 (ГОСТ 2479-65).

5. Установочно-присоединительные размеры должны соответствовать ГОСТ 18709-73.

6. Двигатели должны иметь один выступающий цилиндрический конец вала, рассчитанный на сочленение с валом рабочего механизма посредством упругой муфты.

7. По климатическим условиям двигатели должны быть в исполнении У при категории размещения 4.

8. Двигатели предназначаются для питания от генераторов постоянного тока или от статических преобразователей (тиристоров) с коэффициентом пульсации напряжения не более 1,1.

9. Степень искрения двигателей в режиме работы S1 при номинальной и максимальной частоте вращения не должна превышать $1^1/_2$.

10. Показатели надежности и долговечности: средний срок службы не менее 12 лет при среднем ресурсе не более 30 000 ч, средний ресурс подшипников не менее 12 000 ч, вероятность безотказной работы не менее 0,9 при 200 ч наработки.

11. Во всем неоговоренном двигатели должны удовлетворять ГОСТ 183-71

В табл. 18-2—18-4 приведены основные размеры сердечников двигателей и предварительные данные по привязке мощностей к частотам вращения. Значения к. п. д. соответствуют при этом данным рис. 5-3, P_1/l_δ — рис. 17-8.

Для примера в табл. 18-5 приведены результаты подробного расчета одного из типов двигателей по каждому участку серии: 7,5 кВт при 1500 об/мин в графе «двигатель № 1», 75 кВт при 1500 об/мин в графе «двигатель № 2», 200 кВт при 500 об/мин в графе «двигатель № 3».

Результаты расчета характеристики намагничивания приведены в табл. 18-6, а сама характеристика для двигателя № 1 показана на рис. 18-1.

Размещение обмоток двигателя № 1 в междуполюсном окне показано на рис. 18-2.

Результаты расчета характеристики намагничивания двигателя № 2 приведены в табл. 18-7, а сама характеристика показана на рис. 18-3.

Размещение обмоток двигателя № 2 в междуполюсном окне показано на рис. 18-4.

Результаты расчета характеристики намагничивания двигателя № 3 приведены в табл. 18-8, а сама характеристика показана на рис. 18-5.

Размещение обмоток двигателя № 3 в междуполюсном окне показано на рис. 18-6.

Результаты расчета рабочих характеристик приведены в табл. 18-9, а сами характеристики — на рис. 18-7.

Результаты расчета рабочих характеристик двигателя приведены в табл. 18-10, а сами характеристики — на рис. 18-8.

Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 3 приведены в табл. 18-11, а сами характеристики — на рис. 18-9.

Таблица 18-2

Основные размеры сердечников двигателей участка серии № 1

h, мм	$D_{н1\,макс}$, мм	$D_{н2}$, мм	Порядковая длина сердечника якоря	P_2, кВт, при n, об/мин			η при n, об/мин		
				3000	2200	1500	3000	2200	1500
132	252	130	1	7,5	5,5	4,0	0,85	0,835	0,815
132	252	130	2	11	7,5	5,5	0,86	0,845	0,83
160	308	160	1	15	11	7,5	0,87	0,865	0,84
160	308	160	2	18,5	15	11	0,875	0,89	0,855

Продолжение табл. 18-2

P_1, кВт, при n, об/мин			P_1/l_δ, Вт/мм, при n, об/мин			l_δ, мм, при n, об/мин			Принятые унифицированные длины l_i, мм	$\lambda = l_i/D_{н2}$
3000	2200	1500	3000	2200	1500	3000	2200	1500		
8,8	6,6	4,9	79	60	38	111	110	129	130	1,0
12,8	8,85	6,6	79	60	38	162	145	174	175	1,34
17,3	12,7	8,9	140	106	68	124	119	130	130	0,805
21,1	19,4	12,8	140	106	68	150	183	188	190	1,18

Таблица 18-3

Основные размеры сердечников двигателей участка серии № 2

h, мм	$D_{н1\ макс}$, мм	$D_{н2}$, мм	Порядковая длина сердечника якоря	P_2, кВт, при n, об/мин			η при n, об/мин		
				2200	1500	1000	2200	1500	1000
225	436	230	1	45	37	18,5	0,895	0,89	0,855
225	436	230	2	55	45	22	0,9	0,89	0,86
250	184	258	1	75	55	30	0,905	0,895	0,87
250	484	258	2	90	75	37	0,91	0,9	0,88
280	544	290	1	110	90	45	0,915	0,905	0,885
280	544	290	2	132	110	55	0,915	0,91	0,89

Продолжение табл. 18-3

P_1, кВт, при n, об/мин			P_1/l'_2, Вт/мм, при n, об/мин			l'_2, мм, при n, об/мин			Принятые унифицированные длины l_1, мм	$\lambda=l_2/D_{н2}$
2200	1500	1000	2200	1500	1000	2200	1500	1000		
50	41,5	21	340	230	135	147	180	155	180	0,78
61	50,5	25,5	340	230	135	180	220	188	220	0,96
82,5	61,5	34,5	480	310	186	156	197	185	195	0,755
99	83	42	480	310	186	187	267	226	265	1,02
120	99	50,7	630	425	250	175	211	203	210	0,72
144	121	61,6	630	425	250	209	258	247	260	0,9

Таблица 18-4

Основные размеры сердечников двигателей участка серии № 3

h, мм	$D_{н1\ макс}$, мм	$D_{н2}$, мм	Порядковая длина сердечника якоря	P_2, кВт, при n, об/мин			η при n, об/мин		
				500	400	300	500	400	300
450	878	493	1	200	—	—	0,9	—	—
450	878	493	2	—	200	—	—	0,89	—
500	978	590	1	320	—	200	0,91	—	0,875
500	978	590	2	—	320	—	—	0,9	—
500	978	590	3	—	—	320	—	—	0,895

Продолжение табл. 18-4

P_1, кВт, при n, об/мин			P_1/l'_2, Вт/мм, при n, об/мин			l'_2, мм, при n, об/мин			Принятые длины l_1, мм	$\lambda=l_2/D_{н2}$
500	400	300	500	400	300	500	400	300		
222	—	—	665	—	—	335	—	—	330	0,67
—	224	—	—	530	—	—	425	—	420	0,85
350	—	228	1000	—	690	350	—	330	340	0,57
—	354	—	—	810	—	—	437	—	430	0,73
—	—	358	—	—	690	—	—	520	520	0,88

Таблица 18-5

Сводные данные электромагнитного, теплового и вентиляционного расчетов, определения динамических параметров отдельных двигателей постоянного тока

№ п/п	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
	Исходные данные (задание)				
1	Полезная мощность на валу P_2, кВт	—	7,5	75	200
2	Номинальная частота вращения n, об/мин	—	1500	1500	500
3	Номинальное напряжение U, В	—	220	220	440
4	Высота оси вращения h, мм	—	160	250	450
5	Степень защиты	—	IP22	IP22	IP44
6	Способ охлаждения	—	IC01	IC01	IC37
7	Род возбуждения	—	Параллельное со стабилизирующей последовательной обмоткой		Независимое напряжение 440 В
8	Максимальная частота вращения при регулировании ослаблением поля главных полюсов $n_{макс}$, об/мин	—	3000	2200	1500
9	Минимальная частота вращения при регулировании напряжением на якоре $n_{мин}$, об/мин	—	500	300	50
10	Допустимая кратковременная перегрузка, %	—	50	50	100
11	Класс нагревостойкости изоляции с использованием ее по нагреву	—	B	F	F
12	Режим работы	—	S1		
13	Климатические условия	—	Исполнение У при категории размещения 4		
14	Исполнение по форме монтажа	—	М101		

	1. Сердечники якоря и полюсов, станина				
15	Марка стали сердечника якоря и ее толщина, мм	§ 17-1, а	2013; 05	2312; 0,5	2411; 0,5
16	Коэффициент заполнения сердечника якоря сталью k_c	§ 17-1, а	0,95	0,95	0,95
17	Припуск на сборку сердечника якоря по ширине b_c, мм	Табл. 17-	0,2	0,3	0,4
18	То же по высоте h_c, мм	Табл. 17-1	—	0,3	0,35
19	Скос пазов	§ 17-1, а	1 зубцовое деление	3/4 зубцового деления	1/2 зубцового деления
20	Марка стали сердечника главного полюса; толщина стали, мм	§ 17-1, б	3411; 1,0	3411; 1,0	3111; 1,0
21	Коэффициент заполнения сердечника главного полюса сталью k_c	§ 17-1, б	0,98	0,98	0,98
22	Наличие компенсационной обмотки	§ 17-1, б	—	—	Компенсационная обмотка
23	Воздушный зазор (форма)	§ 17-1, б	Эксцентричный	Эксцентричный	Концентричный
24	Марка стали сердечника добавочных полюсов и ее толщина	§ 17-1, в	3411; 1,0	3411; 1,0	3411; 1,0
25	Коэффициент заполнения сердечника добавочного полюса сталью k_c	§ 17-1, в	0,98	0,98	0,98
26	Марка стали станины	§ 17-1, г	Цельнотянутая труба; Ст3	Листовой прокат; Ст3	2312; 1,0
27	Коэффициент заполнения станины сталью k_c	§ 17-1, г	1,0	1,0	0,98
	2. Предварительное определение размеров магнитопровода				
28	К. п. д. η	Рис. 5-3, а	0,84	0,9	0,9
29	Подводимая мощность P_1, Вт	(17-1)	$\frac{7,5\cdot10^3}{0,84}=8,9\cdot10^3$	$83,3\cdot10^3$	$222,2\cdot10^3$
30	Вид материала для штамповки листов якоря	§ 17-2, а	Резаная лента	Резаная лента	Рулон
31	Минимальное допустимое расстояние от нижней части станины до опорной плоскости лап h_2, мм	Табл. 17-5	6	8	—
32	То же	Табл. 17-6	—	—	11

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
33	Максимальный допускаемый наружный диаметр станины $D_{1\,макс}$, мм	Табл. 17-6	305	484	878
34	Максимальный допускаемый наружный диаметр якоря $D_{н2\,макс}$, мм	Табл. 17-6	160	258	522
35	Принятый наружный диаметр якоря $D_{н2}$, мм	Табл. 17-6	160	258	493
36	Подводимая мощность, приходящаяся на единицу расчетной длины сердечника якоря P_2/l'_2, Вт/мм	Рис. 17-6	68	312	670
37	Расчетная длина якоря l'_2, мм	§ 17-2, а	$\frac{8,9 \cdot 10^4}{68} = 130$	267	332
38	Отношение расчетной длины сердечника якоря к его наружному диаметру λ	§ 17-2, а; рис. 17-9	$\frac{130}{160} = 0,81$	1,03	0,67
39	Внутренний диаметр листов якоря D_2, мм	Рис. 17-10	50	80	160
40	Количество аксиальных каналов сердечника якоря $n_{к2}$	Табл. 17-8	—	18 (1 ряд)	30 (2 ряда)
41	Диаметр аксиальных каналов $d_{к2}$, мм	То же	—	18	30
42	Округленная конструктивная длина якоря l_2, мм	§ 17-2, б	130	265	330
43	Зазор между главным полюсом и якорем δ, мм	Рис. 17-11	—	—	4
44	Эквивалентный эксцентричный зазор между главным полюсом и якорем δ, мм	То же	1,6	2,5	—
45	Высота эксцентричного зазора у оси полюса δ', мм	(17-4)	$\frac{1,6}{1,5} = 1,07$	1,67	—
46	Высота эксцентричного зазора у края полюса δ'', мм	(17-4)	$2 \cdot 1,6 = 3,2$	5	—

47	Длина сердечника главного полюса $l_п$, мм	§ 17-2, б	130	265	330
48	Высота сердечника главного полюса $h_т$, мм	Рис. 17-12, § 17-2	32	76	113
49	Число главных полюсов $2p$	§ 17-2, б	4	4	4
50	Полюсное деление τ, мм	(17-5)	$\frac{3,14 \cdot 160}{4} = 125,6$	202,5	387
51	Расчетная ширина полюсной дуги $b'_{к.п}$, мм	(17-5)	$0,62 \cdot 125,6 = 78$	132	263
52	Ширина полюсной дуги при эксцентричном зазоре, $b_{г.п}$, мм	(17-6)	78	132	—
53	Ширина полюсной дуги при концентричном зазоре, $b_{н.п}$, мм	(17-7)	—	—	255
54	Предварительное значение магнитного потока $\Phi_{предл}$, Вб	(17-8)	$0,665 \cdot 78 \cdot 130 \cdot 10^{-6} = 6,74 \cdot 10^{-3}$	$25,7 \cdot 10^{-3}$	$83,7 \cdot 10^{-3}$
55	Эффективная длина сердечника главного полюса $l_{эф.п}$, мм	(17-9)	$0,98 \cdot 130 = 127,5$	259,5	323,5
56	Ширина сердечника главного полюса $b_п$, мм	(17-9)	$\frac{1,2 \cdot 6,74 \cdot 10^{-3}}{127,5 \cdot 1,65} \cdot 10^{6} = 38,5$	72	158
57	Ширина выступа полюсного наконечника $b'_т$, мм	§ 17-2, б	$0,1 \cdot 38,5 \approx 4$	7	19
58	Высота края полюсного наконечника $h'_{к.н}$, мм	(17-10)	$\frac{(78-38,5)0,665}{1,67 \cdot 1,65} = 9,5$	15,7	23,1
59	Длина наконечника добавочного полюса $l_{н.д}$, мм	§ 17-2, б	130	265	330
60	Длина сердечника добавочного полюса $l_д$, мм	§ 17-2, б	130	265	330
61	Ширина сердечника добавочного полюса $b_д$, мм	Рис. 17-15	19	32	38
62	Воздушный зазор между наконечником добавочного полюса и якорем $\delta_д$, мм	Рис. 17-16	3,3	5	8,5
63	Число добавочных полюсов $2p_д$	§ 17-2, б	4	4	4
64	Длина станины l_1, мм	§ 17-2, б	$130+0,65 \cdot 125,6-212 \approx 220$	$397 \approx 400$	$582 \approx 590$

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей № 1	№ 2	№ 3
65	Высота станины $h_{с1}$, мм	(17-11)	$\frac{1{,}2\ 6{,}74\cdot10^{-3}}{2\cdot1\cdot220\cdot1{,}2}10^6 = 15{,}3 \approx 16$	32	60
66	Магнитная индукция в месте входа магнитного потока из станины в главный полюс $B_{с.п}$, Т	(17-12)	$\frac{1{,}2\cdot6{,}74\cdot10^{-3}}{2(130+38{,}5)14{,}7}10^6 = 1{,}5$	1,43	1,6
67	Внутренний диаметр станины D_1, мм	(17-13)	$160+2\cdot52+4\cdot1{,}6=270$	420	735
68	Наружный диаметр станины из монолитного материала $D_{н1}$, мм	(17-14)	$270+2\cdot16=302$	484	—
69	Наружный диаметр (высота) шихтованной станины $D_{н1}$, мм	(17-15)	—	—	$735+2\cdot60+20=875$

3. Обмотка якоря

а) Типы и шаги обмоток. Число витков обмотки якоря, число коллекторных пластин и пазов

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	№ 1	№ 2	№ 3
70	Коэффициент k_I	(17-29); рис. 17-22	$1-0{,}025=0{,}975$	0,99	0,99
71	Предварительное значение тока якоря I_2, А	(17-29)	$0{,}975\frac{8900}{220}=39{,}4$	374	500
72	Тип обмотки якоря	Табл. 17-10	Простая волновая	Простая волновая	Простая петлевая
73	Коэффициент k_e	(17-30), рис. 17-23	$1-0{,}1=0{,}9$	0,945	0,935
74	Предварительное число витков обмотки якоря $w_{2пред}$	(17-30)	$\frac{30\cdot0{,}9\cdot220}{^2/_1\cdot1500\cdot6{,}74\cdot10^{-3}}=294$	81	295
75	Число витков в секции обмотки якоря w_{c2}	(17-31)	$1{,}8\frac{294}{160}=3{,}3$	0,72	1,37
76	Форма пазов якоря	§ 17-1	Полузакрытая	Открытая	Открытая
77	Принятое число витков в секции обмотки якоря w_{c2}	—	$3^1/_3\ (3-4-3)$	1	1

78	Число секций, расположенных по ширине паза $N_{ш}$	Табл. 17-9	3	3	6
79	Число пазов якоря Z_2	(17-32); табл. 17-9	29	27	58
80	Число коллекторных пластин K	(17-33)	87	81	290
81	Число пазов, приходящихся на пару полюсов, Z_2/p	Табл. 17-9	$14^1/_2$	$13^1/_2$	29
82	Число коллекторных пластин, приходящихся на пару полюсов, K/p	То же	$43^1/_2$	$40^1/_2$	145
83	Зубцовое деление по наружному диаметру якоря t_2, мм	(17-34)	17,3	30	26,7
84	Стандартный наружный диаметр коллектора $D_к$, мм	(17-35), (17-36)	125	180	355
85	Окружная скорость коллектора $v_к$, м/с	(17-37)	$\frac{3,14\cdot125\cdot1500}{60\,000}=9,8$	14,1	9,2
86	Коллекторное деление $t_к$, мм	(17-38)	$\frac{3,14\cdot125}{87}=4,5$	6,9	3,84
87	Максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами при нагрузке $U_{к.макс}$, В	(17-39а), табл. 17-11	$\frac{4\cdot220}{0,62\cdot87}\cdot1,7=27,7$	23,5	8,9
88	Уточненное число витков обмотки якоря w_2	(17-40а)	$3^1/_3\cdot87=290$	81	290
89	Число эффективных проводников в пазу $N_{п2}$	(17-40б)	$2\cdot3\cdot3^1/_3=20$	6	10
90	Ток в пазу $\Sigma I_{п2}$, А	(17-41)	$20\,\frac{39,4}{2}=394$	1122	1250
91	Уточненная расчетная длина сердечника якоря l'_2, мм	(17-42)	Практически не меняется, поэтому остаются без изменения предварительные значения l_2, $l_п$, $l_{н.д}$, $l_д$, l_1		
92	Линейная нагрузка якоря A_2, А/см	(17-43)	$\frac{20\cdot290\cdot39,4}{3,14\cdot160\cdot2}=227$	374	458
93	Шаг по реальным пазам $y_п$	Табл. 17-9	$\frac{29}{4}-\frac{1}{4}=7$	7	14
94	Шаг по коллектору $y_к$	Табл. 17-9	$\frac{87-1}{2}=43$	40	1

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
95	Результирующий шаг $y = y_к$	Табл. 17-9	43	40	1
95	Первичный шаг по элементарным пазам y_1	Табл. 17-9	$3 \cdot 7 = 21$	21	70
97	Вторичный шаг по элементарным пазам y_2	Табл. 17-9	$43 - 21 = 22$	19	69
98	Шаг уравнительных соединений $y_{ур}$	Табл. 17-9	—	—	145
	б) Размеры овальных полузакрытых пазов и круглых проводников обмотки				
99	Предварительная ширина зубца с равновеликим сечением b_{z2}, мм	(17-44)	$\frac{17{,}3 \cdot 0{,}665}{0{,}95 \cdot 1{,}95} = 6{,}2$	—	—
100	Больший радиус r_1, мм	(17-45)	$\frac{3{,}14(160 - 2 \cdot 0{,}8) - 29 \cdot 6{,}2}{2(29 + 3{,}14)} = 5$	—	—
101	Эффективная длина сердечника якоря $l_{эф2}$, мм	(17-46)	$0{,}95 \cdot 130 = 123{,}5$	—	—
102	Высота спинки якоря h_{c2}, мм	(17-46)	$\frac{160 - 30}{2} - 25 = 30$	—	—
103	Магнитная индукция в спинке якоря B_{c2}, Т	(17-46)	$\frac{6{,}74 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 123{,}5 \cdot 30} = 0{,}91$	—	—
104	Меньший радиус r_2, мм	(17-47)	$\frac{3{,}14(160 - 2 \cdot 25) - 29 \cdot 6{,}2}{2(29 - 3{,}14)} = 3{,}2$	—	—
105	Расстояние между центрами радиусов h_1, мм	(17-48)	$25 - 0{,}8 - 5 - 3{,}2 = 16$	—	—
106	Площадь поперечного сечения паза в штампе $Q_{п2}$, мм²	(17-49)	$\frac{3{,}14}{2}(5^2 + 3{,}2^2) + (5 + 3{,}2)16 = 186{,}5$	—	—
107	Площадь поперечного сечения паза в свету $Q'_{п2}$, мм²	(17-50)	$\frac{3{,}14}{2}\left[\left(5 - \frac{0{,}2}{2}\right)^2 + \left(3{,}2 - \frac{0{,}2}{2}\right)^2\right] + (5 + 3{,}2 - 0{,}2)16 = 180{,}8$	—	—

108	Площадь поперечного сечения корпусной изоляции $Q_{и}$, мм²	(17-51)	$0{,}5(2\cdot 3{,}14\cdot 5+3{,}14\cdot 3{,}2+2\cdot 16)=37{,}5$	—	—
109	Площадь поперечного сечения клина и прокладок между катушками в пазу $Q_{кл}+Q_{пр}$, мм²	(17-51)	$5\cdot 5=25$	—	—
110	Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой $Q''_{пз}$, мм²	(17-51)	$180{,}8-36{,}7-25=119{,}1$	—	—
111	Марка провода обмотки якоря	§ 17-2, в	ПЭТВ	—	—
112	Диаметр голого провода d, мм	Приложение 30	1,4	—	—
113	Диаметр изолированного провода d', мм	То же	1,485	—	—
114	Площадь поперечного сечения голого провода q, мм²	» »	1,539	—	—
115	Число элементарных проводов в эффективном проводнике c		2	—	—
116	Коэффициент заполнения паза изолированными проводами k_1	(17-53)	$\frac{2\cdot 20\cdot 1{,}485^2}{119{,}1}=0{,}74$	—	—
117	Ширина шлица $b_{ш}$, мм	§ 17-2, в	2,5	—	—
118	Плотность тока в обмотке якоря J_2, А/мм²	(17-54)	$\frac{39{,}4}{2\cdot 2\cdot 1{,}539}=6{,}4$	—	—
119	Показатель тепловой нагрузки A_2J_2, А²/(см·мм²)	§ 17-2, в	$227\cdot 6{,}4=1453$	—	—
120	Среднее зубцовое деление якоря $t_{ср}$, мм	(17-55)	$\frac{3{,}14(160-25)}{29}=14{,}6$	—	—
121	Средняя ширина секции обмотки $b_{ср}$, мм	(17-55)	$14{,}6\cdot 7=102$	—	—
122	Средняя длина одной лобовой части секции обмотки $l_{л}$, мм	(17-56)	$(0{,}7-0{,}4\cdot 2)102+15=168$	—	—
123	Средняя длина витка обмотки $l_{ср2}$, мм	(17-57)	$2(130+168)=596$	—	—
124	Сопротивление обмотки при расчетной рабочей температуре 75°С r_2, Ом	(17-58)	$\frac{290\cdot 596}{46{,}5\cdot 2^2\cdot 2\cdot 1{,}539\cdot 10^3}=0{,}302$	—	—

Продолжение табл. 18

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
125	Вылет лобовой части обмотки $l_{в2}$, мм	(17-59)	$(0,12+0,14\cdot 2)\,102+7,5=48,3$	—	—
	в) Размеры прямоугольных открытых пазов и прямоугольных проводников обмотки				
126	Предварительная ширина зубца в наиболее узком месте $b_{з2мин}$, мм	(17-60)	—	$\frac{30\cdot 0,755}{2,2\cdot 0,95}=10,5$	11,6
127	Эффективная длина сердечника якоря $l_{эф2}$, мм	(17-46)	—	$0,95\cdot 265=252$	314
128	Высота спинки якоря h_{c2}, мм	(17-61)	—	$\frac{258-80}{2}-32=57$	124,5
129	Магнитная индукция в спинке якоря B_{c2}, Т	(17-61)	—	$\frac{25,7\cdot 10^{-3}\cdot 10^{6}}{2\cdot 252(57-{}^{2}/_{3}\cdot 18)}=1,13$	1,27
130	Ширина паза в штампе $b_{п2}$, мм	(17-62)	—	$\frac{3,14(258-2\cdot 32)}{27}-10,5=12$	10,5
131	Способ крепления обмотки в пазу	§ 17-2, г	—	Стеклобандаж	Клин
132	Число проводников по высоте паза $N_в$	§ 17-2, г	—	4	4
133	Допустимая высота проводника с витковой изоляцией h', мм	(17-63)	—	$\frac{32-4,8-3-0,3}{4}=5,97$	7,72
134	Допустимая ширина проводника с витковой изоляцией b', мм	(17-64)	—	$\frac{12-1,7-0,3-0,1}{3}=3,3$	1,55
135	Марка провода	§ 17-2, г	—	ПЭТП-155	ПСД
136	Допустимая высота голого провода h, мм	(17-65)	—	$5,97-0,15=5,82$	7,45
137	Допустимая ширина голого провода b, мм	(17-66)	—	$3,3-0,15=3,15$	1,28
138	Ближайшие стандартные размеры провода без изоляции $b\times h$, мм	Приложение 31	—	$3,15\times 5,3$	$1,25\times 7,5$

139	Размеры стандартного провода с изоляцией $b' \times h'$, мм	Приложение 32	—	$3{,}3 \times 5{,}45$	$1{,}52 \times 7{,}77$
140	Площадь поперечного сечения стандартного провода q, мм²	Приложение 31	—	16,15	9,16
141	Окончательная округленная высота паза $h_{пс}$, мм	(17-63)	—	$4 \cdot 5{,}45 + 4{,}8 + 3 + 0{,}3 = 30$	41,8
142	Окончательная округленная ширина паза $b_{пс}$, мм	(17-64)	—	$3 \cdot 3{,}3 - 1{,}7 + 0{,}3 + 0{,}1 = 12$	10,4
143	Плотность тока в обмотке якоря J_a, А/мм²	(17-54)	—	$\frac{374}{2 \cdot 2 \cdot 16{,}15} = 5{,}8$	6,85
144	Показатель тепловой нагрузки $A_2 J_a$, А²/(см·мм²)	§ 17-2, г	—	$374 \cdot 5{,}7 = 2160$	3190
145	Среднее зубцовое деление якоря $t_{ср}$, мм	(17-55)	—	$\frac{3{,}14(258-30)}{27} = 26{,}4$	24,4
146	Средняя ширина секции обмотки $b_{ср}$, мм	(17-55)	—	$26{,}4 \cdot 7 = 185$	342
147	Средняя длина одной лобовой части секции обмотки $l_{л}$, мм	(17-67)	—	$\frac{185}{\sqrt{1-\left(\frac{12-3{,}5}{30}\right)^2}} + 30 + 40 = 285$	468
148	Средняя длина витка обмотки $l_{ср}$, мм	(17-57)	—	$2(265 + 285) = 1100$	1596
149	Сопротивление обмотки при расчетной рабочей температуре 115°С r_2, Ом	(17-58)	—	$\frac{81 \cdot 1100}{47{,}3 \cdot 2^2 \cdot 2 \cdot 16{,}15 \cdot 10^3} = 0{,}0165$	0,0388
150	Вылет лобовой части обмотки $l_{в}$, мм	(17-68)	—	$\frac{185}{2} \frac{\frac{12+3{,}5}{30}}{\sqrt{1-\left(\frac{12+3{,}5}{30}\right)^2}} + \frac{30}{2} + 20 = 89$	145

4. Сложносная компенсационная обмотка

151	М. д. с. якоря, приходящаяся на полюсную дугу, F'_a, А	(17-70)	—	—	$\frac{255}{20} \cdot 468 = 5970$

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
152	Число витков обмотки, приходящихся на полюс, w_1	(17-89)	—	—	$\frac{5970\cdot1}{500}=11,94$ (округляем до 12)
153	Число пазов на полюс Z_1	(17-90)	—	—	$\frac{2\cdot12}{2}=12$
154	М. д. с., приходящаяся на полюс, F_1, А	§ 17-5, б	—	—	$\frac{12\cdot500}{1}=6000$
155	Коэффициент компенсации k_k, о. е.	(17-71)	—	—	$\frac{6000}{5970}\approx1$
156	Ток в пазу $\Sigma I_{п1}$, А	§ 17-5, б	—	—	$2\cdot\frac{500}{1}=1000$
157	Зубцовое деление в наиболее узком месте $t_{1мин}$, мм	(17-75)	—	—	$\frac{225}{12}\cdot\frac{493+2\cdot4+2\cdot0,5}{493+2\cdot4}=21,3$
158	Ширина зубца в наиболее узком месте $b_{з1мин}$, мм	(17-76)	—	—	$\frac{21,3\cdot0,95\cdot1,05}{0,98\cdot1,7}=12,7$
159	Ширина паза в штампе $b_{п1}$, мм	(17-77)	—	—	$21,3-12,7=8,6$
160	Допустимая ширина голого провода b, мм	(17-91)	—	—	$\frac{8,6-2,5-0,3}{1}=5,8$
161	Необходимая площадь поперечного сечения элементарного проводника q_1, мм²	(17-92)	—	—	$\frac{500}{1\cdot5\cdot5,8}=17,2$
162	Ближайшие размеры стандартного элементарного провода $b\times h$, мм	Приложение 31	—	—	$5,6\times3,15$
163	Площадь поперечного сечения стандартного элементарного проводника q_1, мм²	То же	—	—	17,09
164	Уточненная ширина паза в штампе $b_{п1}$, мм	(17-93)	—	—	$1\cdot5,6+2,5+0,3=8,4$
165	Уточненная высота паза в штампе $h_{п1}$, мм	(17-94)	—	—	$1\cdot10\cdot3,15+3,6+2,5+1+0,3=38,9$

26*

166	Уточненная ширина зубца в наиболее узком месте $b_{31мин}$, мм	(17-77)	—	—	$21,3-8,4=12,9$
167	Уточненная максимальная магнитная индукция в зубцах $B_{31макс}$, Т	§ 17-5	—	—	$1,7\cdot\frac{12,7}{12,9}=1,67$
168	Средняя ширина секции обмотки $b_{ср}$, мм	(17-95)	—	—	$\frac{3,14\cdot 493}{4}\left(1-\frac{0,68}{2}\right)=255$
169	Длина одной лобовой части витка $l_{л1}$, мм	(17-96)	—	—	$\frac{255}{\sqrt{1-\left(\frac{8,4+5}{21,3}\right)^2}}+38,9+60=415$
170	Средняя длина витка обмотки $l_{ср1}$, мм	(17-97)	—	—	$2(330+415)=1490$
171	Сопротивление обмотки при расчетной рабочей температуре 115°С r_1, Ом	(17-98)	—	—	$\frac{4\cdot 12\cdot 1490}{41,3\cdot 1\cdot 5\cdot 17,09\cdot 10^3}=0,0202$
172	Вылет лобовой части обмотки $l_{в1}$, мм	(17-99)	—	—	$\frac{255}{2}\cdot\frac{\frac{8,4+5}{21,3}}{\sqrt{1-\left(\frac{8,4+5}{21,3}\right)^2}}+\frac{38,9}{2}+30=156$
	5. Обмотка добавочных полюсов				
173	Поперечная м. д. с. якоря, приходящаяся на один полюс, F_q, А	(17-69)	$\frac{290\cdot 39,4}{2\cdot 4}=1426$	3785	9056
174	Число витков катушки добавочного полюса у некомпенсированного двигателя (округленное) $w_д$	(17-100)	$\frac{1,25\cdot 1426\cdot 1}{39,4}\approx 45$	13	—
175	То же у компенсированного двигателя (округленное) $w_д$	(17-101)	—	—	$\frac{1,25\cdot 9056-6000}{500}\approx 11$
176	М. д. с. обмотки одного добавочного полюса $F_д$, А	(17-102)	$\frac{45\cdot 39,4}{1}=1773$	4862	5500

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
177	Уточненное значение коэффициента $k_х$	§ 17-6	$\frac{1773}{1426} = 1,24$	1,28	1,26
178	Расчетная площадь поперечного сечения проводника обмотки $q_д$, мм²	(17-103)	$\frac{39,4}{1 \cdot 3,9} = 10,1$	93,5	119
179	Тип обмотки и марка провода	§ 17-6	Многослойная из проводов марки ПЭТВП	Неизолированные	
180	Размеры стандартного прямоугольного голого провода $b \times h$, мм	Приложение 31	2,5×4,25	25×3,8	30×4
181	Размеры стандартного прямоугольного изолированного провода $b' \times h'$, мм	Приложение 32	2,65×4,4	—	—
182	Площадь поперечного сечения стандартного провода $q_д$, мм²	Приложение 31	10,08	94,5	119,5
183	Уточненная плотность тока $J_д$, А/мм²	(17-103)	$\frac{39,4}{1 \cdot 10,08} = 3,9$	3,95	4,2
184	Средняя длина витка многослойной катушки из изолированных проводов $l_{ср.д}$, мм	(17-104)	$2(130 + 19) + 3,14(16 + 2 \cdot 1,25 + 2 \cdot 2) = 369$	—	—
185	То же однослойной катушки из голых проводов, намотанных на ребро, $l_{ср.д}$, мм	(17-105)	—	$2 \cdot 265 + 3,14(32 + 25 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 2) = 740$	905
186	Радиус закругления голых проводов, намотанных на ребро, r, мм	(17-106)	—	$\frac{32 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 2}{2} = 21$	24
187	Сопротивление обмотки, приведенное к стандартной расчетной температуре 115 °С $r_д$, Ом	(17-107)	$\frac{4 \cdot 45 \cdot 369}{46,5 \cdot 1 \cdot 10,08 \cdot 10^3} = 0,142$	0,00985	0,0081

6. Стабилизирующая последовательная обмотка главных полюсов

188	Предварительная м. д. с. стабилизирующей обмотки одного полюса F_c, А	(17-108)	$0,18 \cdot 1426 = 257$	681	—
189	Число витков в катушке (округленное) w_c	(17-109)	$\frac{257 \cdot 1}{39,4} = 6,5$ (округляем до 7)	8	—
190	М. д. с. обмотки при округленном числе витков F_c, А	(17-109)	$7 \cdot 39,4 = 276$	748	—
191	Расчетная площадь поперечного сечения проводника обмотки q_c, мм²	(17-110)	$\frac{39,4}{1 \cdot 3,9} = 10,1$	93,5	—
192	Тип обмотки и марка провода	§ 17-7	Многослойная из провода марки ПСД	Голые провода (на ребро)	—
193	Размеры стандартного прямоугольного голого провода $b \times h$, мм	Приложение 31	$2,5 \times 4,25$	$25 \times 3,8$	—
194	Размеры стандартного прямоугольного изолированного провода $b' \times h'$, мм	Приложение 32	$2,65 \times 4,4$	—	—
195	Площадь поперечного сечения стандартного провода q_c, мм²	Приложение 31	10,08	94,5	—
196	Уточненная плотность тока J_c, А/мм²	(17-110)	$\frac{39,4}{1 \cdot 10,08} = 3,9$	4	—
197	Средняя длина витка однослойной или многослойной катушки из изолированных проводов $l_{ср.с}$, мм	(17-111)	$2(130 + 38,5) + 3,14(16 + 2 \cdot 1,25 + 2 \cdot 2) = 396$	—	—
198	Радиус закругления голой меди r, мм	(17-106)	—	$0,05 \frac{25^2}{3,8} = 8,25 \approx 9$	—
199	Средняя длина витка однослойной катушки из голых проводов, намотанных на ребро, $l_{ср.с}$, мм	(17-112)	—	$2(265 + 72) + 3,14(25 + 2 \cdot 9) = 809$	—
200	Сопротивление обмотки, приведенное к расчетной температуре 115 °С r_c, Ом	(17-113)	$\frac{4 \cdot 7 \cdot 396}{46,5 \cdot 1 \cdot 10,08 \cdot 10^3} = 0,0236$	0,00168	—

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формулы, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
	7. Магнитная цепь				
	а) Магнитный поток при номинальном режиме работы				
201	Э. д. с. при номинальном режиме работы $E_з$, В	(17-114)	$220-39,4(0,302+0,142+0,0236)-2=199,5$	207,5	404,5
202	Уточненное значение магнитного потока Ф, Вб	(17-115)	$\frac{30\cdot 199,5}{{}^2/_1\cdot 1500\cdot 290}=6,88\cdot 10^{-3}$	$25,6\cdot 10^{-3}$	$83,4\cdot 10^{-3}$
	б) Воздушный зазор				
203	Площадь поперечного сечения воздушного зазора $Q_δ$, мм²	(17-116)	$78\cdot 130=10\,140$	34 980	86 800
204	Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре $B_δ$, Т	(17-117)	$\frac{6,88\cdot 10^{-3}}{10\,140}\cdot 10^{6}=0,678$	0,734	0,957
205	Коэффициент воздушного зазора при полузакрытых пазах наконечника главного полюса компенсированной машины $k_{δ1}$	(17-120)	—	—	$1+\frac{8,4}{21,3-8,4+5\cdot 4\cdot \frac{21,3}{8,4}}=1,14$
206	То же при полузакрытых пазах якоря $k_{δ2}$	(17-121)	$1+\frac{2,5}{17,3-2,5+5\cdot 1,6\cdot \frac{17,3}{2,5}}=1,05$	1,23	1,15
207	То же при немагнитных бандажах $k_δ$	(17-122)	—	$1+\frac{0,25\cdot 265\cdot 3}{265(2,5+5)-0,25\cdot 265\cdot 3}=1,10$	—
208	Коэффициент воздушного зазора $k_δ$	(17-119)	1,05	1,42	1,31
209	Магнитное напряжение воздушного зазора $F_δ$, А	(17-118)	$0,8\cdot 1,6\cdot 1,05\cdot 0,678\cdot 10^{3}=910$	2080	4020

в) Зубцы якоря при овальных полузакрытых пазах

210	Площадь равновеликого поперечного сечения зубцов $Q_{з2}$, мм²	(17-125)	$\frac{29}{4} \cdot 0,62 \cdot 6,2 \cdot 123,5 = 3437$	—	—
211	Магнитная индукция в равновеликом сечении зубцов $B_{з2}$, Т	(17-126)	$\frac{6,88 \cdot 10^3}{3437} = 2,0$	—	—
212	Зубцовое деление на 1/3 высоты $t_{2(1/3)}$, мм	(17-127)	$\frac{3,14(160 - 4/3 \cdot 25)}{29} = 13,7$	—	—
213	Коэффициент $k_{з(1/3)}$	(17-127)	$\frac{13,7}{6,2 \cdot 0,95} = 2,31$	—	—
214	Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце $L_{з2}$, мм	(17-128)	$25 - 0,2 \cdot 3,2 = 24,1$	—	—
215	Магнитное напряжение зубцов $F_{з2}$, А	(17-129)	$0,1 \cdot 150 \cdot 24,4 = 365$	—	—

г) Зубцы якоря при прямоугольных открытых пазах

216	Ширина зубца в расчетном наименьшем поперечном сечении $b_{з2мин}$, мм	(17-137)	—	$\frac{3,14(258 - 2 \cdot 30)}{27} - 12 = 11$	11,7
217	Площадь поперечного сечения зубцов в этом же сечении $Q_{з2мин}$, мм²	(17-131)	—	$\frac{27}{4} \cdot 0,647 \cdot 11 \cdot 252 = 12\,300$	36 300
218	Магнитная индукция в этом же сечении, $B_{з2макс}$, Т	(17-132)	—	$\frac{25,6 \cdot 10^{-4}}{12\,200} \cdot 10^4 = 2,1$	2,3
219	Ширина зубца в расчетном наибольшем поперечном сечении $b_{з2макс}$, мм	(17-137)	—	$30 - 12 = 18$	16,3
220	Средняя ширина зубца $b_{з2ср}$, мм	(17-138)	—	$\frac{11+18}{2} = 14,5$	14,05
221	Наибольшая площадь поперечного сечения зубцов $Q_{з2макс}$, мм²	(17-139)	—	$12\,300 \cdot \frac{18}{11} = 20\,100$	50 500
222	Средняя площадь поперечного сечения зубцов $Q_{з2ср}$, мм²	(17-140)	—	$\frac{12\,300 + 20\,100}{2} = 16150$	43 400

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
223	Наименьшая магнитная индукция $B_{з\,змин}$, Т	(17-141)	—	$\frac{85 \cdot 10^{-3}}{50\,500} \cdot 10^6 = 1,27$	1,65
224	Средняя магнитная индукция $B_{з\,ср}$, Т	(17-142)	—	$\frac{2,08 - 1,27}{2} = 1,67$	1,97
225	Коэффициент $k_{змакс}$	(17-143)	—	$\frac{3,14(258 - 2 \cdot 30)}{27 \cdot 11 \cdot 0,95} = 2,21$	1,98
226	Коэффициент $k_{змин}$	(17-144)	—	—	$\frac{26,7}{16,3 \cdot 0,95} = 1,71$
227	Коэффициент $k_{з\,ср}$	(17-145)	—	—	$\frac{1,71 + 1,98}{2} = 1,84$
228	Расчетное значение напряженности поля $H_{з2}$, А/см	(17-146)	—	$\frac{660 + 4 \cdot 65 + 4,8}{6} = 154$	520
229	Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце $L_{з2}$, мм	(17-136)	—	30,7	41,7
230	Магнитное напряжение зубцов $F_{з2}$, А	(17-129)	—	$0,1 \cdot 154 \cdot 30,7 = 474$	2170

д) Спинка якоря

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	№ 1	№ 2	№ 3
231	Высота спинки якоря h_{c2}, мм	(17-147)	$\frac{160 - 50}{2} - 25 = 30$	58,3	125
232	Расчетное сечение Q_{c2}, мм²	(17-148)	$123,5 \cdot 30 = 3705$	11 668	33 000
233	Магнитная индукция B_{c2}, Т	(17-149)	$\frac{6,88 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3705} \cdot 10^6 = 0,92$	1,09	1,26
234	Расчетная длина магнитной силовой линии l_{c2}, мм	(17-150)	$\frac{3,14(50 + 30)}{8} + \frac{30}{2} = 46,4$	83,4	174
235	Магнитное напряжение F_{c2}, А	(17-151)	$0,1 \cdot 1,01 \cdot 46,4 = 4,7$	24,5	82

е) Зубцы наконечника главного полюса компенсированных двигателей

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	№ 1	№ 2	№ 3
236	Длина дуги полюсного наконечника в расчетном сечении на 1/3 высоты зубца $b_{н(1/3)}$, мм	(17-152)	—	—	$255\left(1 + \frac{2/3 \cdot 38,9}{493 - 2 \cdot 4}\right) = 268$

237	Площадь поперечного сечения зубцов $Q_{з1(1/3)}$, мм²	(17-153)	—	—	$0,98 \cdot 330(268-12 \cdot 8,7)=52\,900$
238	Магнитная индукция $B_{з1(1/3)}$, Т	(17-154)	—	—	$\frac{1,05 \cdot 83,4 \cdot 10^{-3}}{52\,900} \cdot 10^{6}=1,65$
239	Расчетная длина магнитной силовой линии $L_{з1}$, мм	(17-155)	—	—	37,9
240	Магнитное напряжение зубцов $F_{з1}$, А	(17-156)	—	—	$0,1 \cdot 37,9 \cdot 15=57$
			ж) Сердечник главного полюса		
241	Площадь поперечного сечения сердечника полюса $Q_{п}$, мм²	(17-157)	$127,5 \cdot 38,5=4905$	18 720	60 720
242	Магнитная индукция $B_{п}$, Т	(17-158)	$\frac{1,2 \cdot 6,88 \cdot 10^{-3}}{4905} \cdot 10^{6}=1,68$	1,64	1,65
243	Расчетная длина магнитной силовой линии для некомпенсированного двигателя $L_{п}$, мм	(17-159)	52	76	—
244	То же для компенсированного двигателя $L_{п}$, мм	(17-160)	—	—	75
245	Магнитное напряжение сердечника полюса $F_{п}$, А	(17-161)	$0,1 \cdot 18 \cdot 52=94$	106	113
			з) Зазор между главным полюсом и станиной		
246	Эквивалентный зазор $\delta_{п1}$, мм	(17-162)	$2 \cdot 130 \cdot 10^{-4}-0,1=0,126$	0,153	—
247	Магнитное напряжение зазора $F_{п1}$, А	(17-163)	$0,8 \cdot 0,126 \cdot 1,68 \cdot 10^{3}=169$	202	—
			и) Станина		
248	Площадь поперечного сечения массивной станины $Q_{с1}$, мм²	(17-164)	$220 \cdot 16=3520$	12 800	—
249	То же для шихтованной станины $Q_{с1}$, мм²	(17-165)	—	—	$0,98 \cdot 590 \cdot 60=34\,690$
250	Магнитная индукция $B_{с1}$, Т	(17-166)	$\frac{1,2 \cdot 6,88 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3520} \cdot 10^{6}=1,17$	1,2	1,43

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
251	Расчетная длина магнитной силовой линии L_{c1}, мм	(17-167)	$\frac{3,14(270+16)}{8}+\frac{16}{2}=120$	193	342
252	Магнитное напряжение станины F_{c1}, А	(17-168)	$0,1\cdot12,3\cdot120=148$	249	405
	к) Магнитодвижущая сила магнитной цепи				
253	М. д. с. магнитной цепи на один полюс ΣF, А	(17-169)	$910+365+5+94+169-148=1691$	3156	6847
254	Коэффициент насыщения магнитной цепи $k_н$	(17-170)	$\frac{1691}{910+169}=1,58$	1,37	1,7
	л) Параллельная обмотка главных полюсов				
255	Размагничивающее действие реакции якоря F_{pz}, А	(17-172)	$0,14\cdot1426=200$	680	—
256	Необходимая м. д. с. обмотки параллельного возбуждения некомпенсированного двигателя $F_{ш}$, А	(17-171)	$1691+200-276=1615$	3087	—
257	Необходимая м. д. с. обмотки независимого возбуждения компенсированного двигателя $F_{ш}$, А	(17-173)	—	—	6847
258	Средняя длина витка обмотки $l_{ср.ш}$, мм	(17-174)	$2(130+38,5)+3,14(23+2\cdot1,25+2\cdot2)=430$	804	1213
259	Площадь поперечного сечения провода $q_{ш}$, мм²	(17-175)	$\frac{1,15\cdot4\cdot1615\cdot430}{46,5\cdot220\cdot10^4}=0,317$	1,29	2,11
260	Марка провода	—	ПЭТВ	ПЭТ-155	ПЭТ-155
261	Стандартный диаметр голого провода d, мм	Приложение 30	0,64	1,3	1,63
262	Стандартный диаметр изолированного провода d', мм	То же	0,7	1,385	1,765
263	Площадь поперечного сечения стандартного провода q, мм²	» »	0,322	1,327	2,22

264	Откорректированный коэффициент $k_{зап}$	§ 17-9	$1,15\cdot\frac{0,322}{0,317}=1,17$	1,18	1,21
265	Число витков на полюс (округленное) $w_ш$	(17-176)	$\frac{1,17\cdot1615}{4\cdot0,322}=1480$	640*	1030
266	Уточненная плотность тока $J_ш$, А/мм²	(17-176)	$\frac{1,17\cdot1615}{1480\cdot0,322}=4,0$	4,4	3,6
267	Сопротивление обмотки при расчетной рабочей температуре 1 5 °С $r_ш$, Ом	(17-177)	$\frac{4\cdot1480\cdot430}{46,5\cdot0,322\cdot10^4}=169$	37,2	54,3
268	Максимальный ток обмотки возбуждения $I_ш$, А	(17-178)	$\frac{220}{169}=1,3$	5,9	8,1
	9. Размещение обмоток главных и добавочных полюсов				
269	Ширина многослойной катушки главного полюса из изолированного провода круглого поперечного сечения $b_{к.макс}$, мм	(17-179)	$1,06\cdot44\cdot0,7=33$	46	68
270	Высота этой же катушки $h_{к.макс}$, мм	(17-180)	$1,06\cdot37\cdot0,7=28$	16	52
271	Ширина многослойной катушки добавочного полюса из изолированного провода прямоугольного поперечного сечения $b_{к.макс}$, мм	(17-181)	$1,05\cdot5\cdot2,65=11$	—	—
272	Высота этой же катушки $h_к$, мм	(17-182)	$1,05\cdot10\cdot4,41=46$	—	—
273	Высота катушки добавочного полюса из голой меди, намотанной на ребро, $h_{к.д}$, мм	(17-183)	—	56	50
	10. Щетки и коллектор				
274	Расчетная ширина щетки $b'_ш$, мм	(17-184)	$0,75(125,6-78)\frac{125}{160}-$ $-\frac{4,5(3+0,75-0,5)}{10}=13,2$	16,6	[illegible]
275	Принятая ширина щетки $b_ш$, мм	Табл. 17-21		16	25

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
276	Число перекрытых щеткой коллекторных делений γ	(17-185)	$\frac{10}{4,5}=2,2$	2,32	6,5
277	Длина щетки $l_{щ}$, мм	§ 17-11	12,5	25	32
278	Контактная площадь одной щетки $S_{щ}$, мм²	(17-187)	$10\cdot12,5=125$	400	800
279	Необходимая контактная площадь всех щеток $\Sigma S_{щ}$, мм²	(17-188)	$\frac{2\cdot39,4}{10}10^3=788$	6233	12 500
280	Число щеток на одном бракете (округленное) $N_{щ.б}$	(17-189)	$\frac{788}{4\cdot125}=1,58$ (округляем до 2)	5	4
281	Уточненная контактная площадь всех щеток $\Sigma S_{щ}$, мм²	§ 17-11	$2\cdot4\cdot125=1000$	8000	12 800
282	Уточненная плотность тока под щетками $J_{щ}$, А/см²	(17-190)	$\frac{2\cdot39,4}{1000}\cdot10^2=7,88$	9,3	7,8
283	Активная длина коллектора $l_{к}$, мм	(17-191)	$2(12,5+8)+10=51$	175	170
284	Ширина коллекторной пластины $b_{к}$, мм	(17-192)	$4,5-0,8=3,7$	6,1	2,84

11. Коммутационные параметры

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	№ 1	№ 2	№ 3
285	Ширина зоны коммутации $b_{з.к}$, мм	(17-193)	$\left(\frac{10}{4,5}+3-0,5+0,75\right)4,5\cdot\frac{160}{125}=31,5$	55,6	69
286	Уточненное отношение $k_{т.к}$	§ 17-11	$\frac{31,5}{125,6-78}=0,66$	0,69	0,52
287	Приведенный коэффициент проводимости рассеяния овального полузакрытого паза $\lambda_{пз}$	(17-194)	$0,6\cdot\frac{25}{2\cdot3,2}+\frac{0,8}{2,5}+\frac{168}{130}+$	—	—

			$+\frac{2{,}5\cdot 10^{6}}{3^{1}/_{3}\cdot 130\cdot 227\cdot 12{,}5}\cdot\frac{1}{2}=4{,}98$		
288	То же прямоугольного открытого паза $\lambda_{пз}$	(17-195)	—	$0{,}6\cdot\frac{30{,}7}{11{,}7}+\frac{281}{265}+\frac{2{,}5\cdot 10^{6}}{1\cdot 265\cdot 374\cdot 20{,}4}\cdot\frac{1}{2}=3{,}27$	—
289	Средний результирующий коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного открытого паза двигателей с $h>315$ мм $\lambda'_{пз}$	(17-196)	—	—	$\frac{13}{2\cdot 6{,}25}(2{,}52+1{,}03)+0{,}5\times\frac{472}{330}=4{,}42$
290	Среднее значение реактивной э. д. с. $e_р$, В	(17-197)	$2\cdot 3^{1}/_{3}\cdot 130\cdot 227\cdot 12{,}5\times 4{,}98\cdot 10^{-7}=1{,}23$	1,38	1,65
291	Марка щетки	Табл. 17-20	611М	ЭГ4	ЭГ74
292	Среднее значение магнитной индукции в зазоре под добавочным полюсом $B_{\delta д}$, Т	(17-198)	$4{,}98\cdot 227\cdot 10^{-4}=0{,}113$	0,122	0,207
293	Коэффициент воздушного зазора для добавочного полюса при полузакрытых пазах якоря $k_{\delta 1д}$	(17-121)	$1+\frac{2{,}5}{17{,}3-2{,}5+5\cdot 3{,}8\cdot\frac{17{,}3}{2{,}5}}=1{,}02$	1,08	1,05
294	То же при немагнитных бандажах $k_{\delta 2д}$	(17-122)	—	$1+\frac{0{,}25\cdot 265\cdot 3}{265(9{,}5+3)-0{,}25\cdot 265\cdot 3}=1{,}064$	—
295	Общий коэффициент воздушного зазора для добавочного полюса $k_{\delta д}$	(17-200)	1,02	$1{,}08\cdot 1{,}064=1{,}15$	1,05
296	Необходимый зазор под добавочным полюсом $\delta_д$, мм	(17-199)	$\frac{1773-1426}{0{,}08\cdot 0{,}113\cdot 1{,}02}=8{,}8$	9,5	14
297	Ширина полюсного наконечника при наличии скоса пазов якоря $b_{н.д}$, мм	(17-202)	$31{,}5-1{,}8\cdot 3{,}8=24{,}7$	38,1	43,8
298	Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом $\Phi_{\delta д}$, Вб	(17-203)	$31{,}5\cdot 130\cdot 0{,}113\cdot 10^{-6}=0{,}462\cdot 10^{-3}$	$1{,}84\cdot 10^{-3}$	$4{,}71\cdot 10^{-3}$
299	То же в сердечнике добавочного полюса $\Phi_д$, Вб	(17-204)	$3{,}25\cdot 0{,}462\cdot 10^{-3}=1{,}5\cdot 10^{-3}$	$6\cdot 10^{-3}$	$9{,}42\cdot 10^{-3}$

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей № 1	№ 2	№ 3
300	То же в сердечнике добавочного полюса при перегрузке $\Phi'_д$, Вб	(17-205)	$1,5\cdot1,5\cdot10^{-3}=2,25\cdot10^{-3}$	$9\cdot10^{-3}$	$18,84\cdot10^{-3}$
301	Площадь поперечного сечения сердечника добавочного полюса $Q_д$, мм²	(17-206)	$19\cdot130\cdot0,98=2420$	8320	12 300
302	Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса при перегрузке $B_д$, Т	(17-207)	$\frac{2,25}{2420}\cdot10^6=0,93$	1,08	1,53
303	Расчетная магнитная индукция на участках станины, в которых суммируются магнитные потоки главных и добавочных полюсов $B'_{с1}$, Т	(17-208)	$\frac{(1,2\cdot6,88\cdot10^{-3}+2,25\cdot10^{-3})}{2\cdot3520}\times10^6=1,49$	1,51	1,69
304	То же на участках спинки якоря $B'_{с2}$, Т	(17-209)	$\frac{(6,88\cdot10^{-3}+0,462\cdot10^{-3})}{2\cdot3705}\times10^6=0,99$	1,13	1,34
	12. Номинальный режим и рабочие характеристики				
305	Расчетная масса стали зубцов якоря с овальными полузакрытыми пазами $G_{з2}$, кг	(17-210)	$7,8\cdot29\cdot6,2\left(15+\frac{5+3,2}{2}\right)123,5\cdot10^{-6}=3,48$	—	—
306	Расчетная масса стали зубцов якоря с прямоугольными открытыми пазами $G_{з2}$, кг	(17-211)	—	$7,8\cdot27\cdot14,7\cdot30,7\cdot252\times10^{-6}=24$	82,9
307	Магнитные потери в зубцах якоря $P_{з2}$, Вт	(17-212)	$6\cdot2^2\cdot3,48=83,5$	284	256
308	Расчетная масса стали спинки якоря при отсутствии аксиальных каналов G_{c2}, кг	(17-213)	$7,8\,\frac{3,14\,[(160-2\cdot25)^2-50^2]}{4}\,123,5\times10^{-6}=7,25$	—	—

309	То же при наличии аксиальных каналов G_{c3}, кг	(17-214)	—	$7{,}8\left\{\frac{3.14[(258-2\cdot 30{,}7)^2-80^2]}{4}-4580\right\}252\cdot 10^{-6}=40{,}5$	220
310	Магнитные потери в спинке якоря P_{c3}, Вт	(17-215)	$6\cdot 0{,}92^2\cdot 7{,}25=37$	201	292
311	Суммарные магнитные потери в сердечнике якоря ΣP_c, Вт	(17-216)	$83{,}5+37=120{,}5$	485	558
312	Потери на трение щеток о коллектор $P_{т.щ}$, Вт	(17-217)	$5\cdot 1000\cdot 9{,}8\cdot 10^{-3}=49$	564	589
313	Суммарные механические потери $\Sigma P_{мх}$, Вт	(17-218)	$49+67=116$	924	714
314	Добавочные потери при номинальной нагрузке у некомпенсированных двигателей $P_д$, Вт	(17-219)	$0{,}01\frac{7500}{0{,}84}=89$	835	—
315	То же у компенсированных двигателей $P_д$, Вт	(17-220)	—	—	$0{,}005\frac{200\,000}{0{,}9}=1110$
316	Электромагнитная мощность двигателя $P_{эм}$, Вт	(17-221)	$7500-113{,}5+116+89=7818$	77 343	202 423
317	Уточненное значение э. д. с. E_2, В	(17-224)	$\frac{220-2}{2}+\sqrt{\frac{(220-2)^2}{2}-7825\times 0{,}4676}=199{,}6$	207,5	404
318	Уточненное значение тока якоря I_2, А	(17-225)	$\frac{7825}{199{,}6}=39{,}2$	372	500
319	Потери в цепи параллельного возбуждения главных полюсов $P_{м.пг}$, Вт	(17-226)	$220\cdot 1{,}3=286$	1300	[illegible]
320	Подводимая мощность двигателя P_1, Вт	(17-227)	$220\cdot 39{,}2+286=8910$	83 140	223 564
321	Суммарные потери в двигателе ΣP, Вт	(17-228)	$8910-7500=1410$	8140	23 564
322	К. п. д. двигателя η, %	(17-229)	$\left(1-\frac{1410}{8910}\right)100=84{,}2$	90,2	89,5
323	Поперечная м. д. с. якоря F_2, А	(17-69)	$\frac{290\cdot 39{,}2}{2\cdot 4}=1420$	3780	9050

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
324	Размагничивающее действие реакции якоря F_{pq}, А	(17-172)	$0,14 \cdot 1420 = 198$	680	—
325	М. д. с. последовательной стабилизирующей обмотки F_c, А	(17-109)	$\frac{7 \cdot 39,2}{1} = 274$	744	—
326	Результирующая м. д. с. некомпенсированного двигателя ΣF, А	(17-231)	$1615 + 274 - 198 = 1691$	3151	—
327	То же компенсированного двигателя ΣF, А	(17-232)	—	—	6847
328	Уточненное значение частоты вращения n, об/мин	(17-233)	$\frac{30 \cdot 199,6}{{}^2/_3 \cdot 290 \cdot 6,88 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^3 = 1500$	1500	500
329	Вращающий момент на валу двигателя M_2, Н·м	(17-234)	$\frac{9,57 \cdot 7500}{1500} = 47,8$	478	3820
330	Ток двигателя I, А	(17-235)	$39,2 + 1,3 = 40,5$	378	508

13. Тепловой расчет

а) Приведение потерь к предельной допускаемой температуре

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	№ 1	№ 2	№ 3
331	Потери в обмотке якоря, приведенные к предельной допускаемой температуре при выбранном классе нагревостойкости изоляции, $P'_{мя}$, Вт	§ 17-14, а	$39,2^2 \cdot 1,15 \cdot 0,302 = 535$	2440	10 350
332	То же в обмотке добавочных полюсов $P_{м.д}$, Вт	§ 17-14, а	$39,2^2 \cdot 1,15 \cdot 0,142 = 252$	1460	2160
333	То же в последовательной стабилизирующей обмотке $P_{м.с}$, Вт	§ 17-14, а	$39,2^2 \cdot 1,15 \cdot 0,0236 = 42$	249	—
334	То же в параллельной обмотке возбуждения $P_{м.ш}$, Вт	§ 17-14, а	$\frac{220^2}{1,15 \cdot 169} = 249$	1215	3330

335	То же в секционной компенсационной обмотке $P_{м}$, Вт	§ 17-14, а	—	—	$500^2 \cdot 1{,}07 \cdot 0{,}0202 = 5400$

б) Обмотка якоря

336	Превышение температуры охлаждаемой поверхности сердечника якоря над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\theta_{п2}$, °C	(17-236)	$\frac{535(2 \cdot 130/596)+120{,}5}{3{,}14 \cdot 160 \cdot 130 \cdot 10{,}1 \cdot 10^{-6}} = 53{,}5$	63	56
337	Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения овального полузакрытого паза $П_2$, мм	(17-237)	$3{,}14(5+3{,}2)+2 \cdot 16=57{,}8$	—	—
338	То же прямоугольного открытого паза $П_2$, мм	(17-237)	—	$2(12+30)=84$	104,2
339	Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки $\Delta\theta_{и2}$, °C	(17-237)	$\frac{535(2 \cdot 130/596)}{29 \cdot 57{,}8 \cdot 130} \cdot \left(\frac{5+3{,}2}{8 \cdot 14 \cdot 10^{-4}} + \frac{0{,}5}{16 \cdot 10^{-4}}\right) = 4{,}1$	15,6	27,5
340	Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря над температурой воздуха внутри двигателя при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в якоре $\Delta\theta_{п.л2}$, °C	(17-238)	$\frac{535(2 \cdot 168/596)}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 160 \cdot 48{,}3 \cdot 10{,}1 \cdot 10^{-6}} = 61{,}5$	—	—
341	То же при наличии аксиальных каналов $\Delta\theta_{п.л2}$, °C	(17-239)	—	$\frac{2440(2 \cdot 285/1100)}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 258 \cdot 89{,}8 \cdot 9 \cdot 10^{-6}} = 50$	52
342	Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки при овальных полузакрытых пазах $П_{л2}$, мм	(17-240)	$\left(1+\frac{3{,}14}{2}\right)(5+3{,}2)+16=37$	—	—
343	То же при прямоугольных открытых пазах $П_{л2}$, мм	(17-240)	—	$2(12+30)=84$	104,2

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или расчетные параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
344	Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки якоря $\Delta\theta_{я.лв}$, °C	(17-240)	$\frac{535(2\cdot168/596)}{2\cdot29\cdot37\cdot168}\frac{25}{8\cdot14\cdot10^{-4}}=2$	3	4,7
345	Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\theta'_{2}$, °C	(17-241)	$(53,5+4,1)\frac{2\cdot130}{596}+(61,5+2)\frac{2\cdot168}{596}=60,2$	65,3	73,7
346	Сумма потерь $\Sigma P'$, Вт	(17-242)	$1482-(1-0,9)(249+42+252)=1427$	6060	22 475
347	Условная поверхность охлаждения двигателя $S_{д}$, мм²	(17-243)	$3,14\cdot302(130+2\cdot49,3)=215\,000$	670 000	1 700 000
348	Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды $\Delta\theta_{в}$, °C	(17-242)	$\frac{1427}{215\,000\cdot68\cdot10^{-6}}=9,3$	12,3	12,3
349	Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды. $\Delta\theta_{2}$, °C	(17-244)	$60,2+9,3=69,5$	77,6	86
	н) Параллельная обмотка главных полюсов				
350	Условная поверхность охлаждения катушки $S_{ш}$, мм²	(17-245)	$430\cdot58=25\,000$	86 000	180 000
351	Превышение температуры наружной поверхности охлаждения катушки над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\theta_{п.ш}$, °C	(17-245)	$\frac{0,9\cdot249}{4\cdot25\,000\cdot5,1\cdot10^{-6}}=44$	52,5	56,4
352	Перепад температуры в изоляции катушки $\Delta\theta_{и.ш}$, °C	(17-246)	$\frac{0,9\cdot249}{4\cdot25\,000}\left(\frac{23}{2\cdot11\cdot10^{-6}}+\frac{0,2}{16\cdot10^{-6}}\right)=8,5$	14,5	22,2

353	Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta'_{m}$, °C	(17-247)	$44+8,5=52,5$	67	78,6
354	Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды $\Delta\vartheta_{m}$, °C	(17-248)	$52,5+9,3=61,8$	79,3	90,9
	г) Обмотка добавочных полюсов				
355	Условная поверхность охлаждения многослойной катушки из изолированных проводов $S_{д}$, мм²	(17-249)	$378\cdot68=25\,700$	—	—
356	То же однослойной катушки из голых проводов, намотанных на ребро, $S_{д}$, мм²	(17-249)	—	$740(13\cdot3,8+0,6\cdot25)=$ $=47\,700$	56 000
357	Превышение температуры наружной поверхности катушки над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta_{п.д}$, °C	(17-249)	$\frac{0,9\cdot252}{4\cdot25\,700\cdot5,1\cdot10^{-5}}=43,3$	78	59
358	Перепад температуры в изоляции многослойных катушек из изолированных проводов $\Delta\vartheta_{и.д}$, °C	(17-250)	$\frac{0,9\cdot252}{4\cdot25\,700}\,\frac{0,2}{16\cdot10^{-5}}=2,8$	—	—
359	Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta'_{д}$, °C	(17-251)	$43,3+2,8=46,1$	—	—
360	Среднее превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды $\Delta\vartheta_{д}$, °C	(17-252)	$46,1+9,3=55,4$	90,3	71,3
	д) Секционная компенсационная обмотка				
361	Добавочные магнитные потери в полюсных наконечниках P_{c1}, Вт	(17-254)	—	—	$2,8[(1,14-1)0,977-21,3]^2\times$ $\times\left(\frac{58\cdot500}{10^4}\right)^{1,5}\frac{4\cdot255\cdot300}{10^6}=$ $=40$

Продолжение табл. 18-5

№ п/п	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей		
			№ 1	№ 2	№ 3
352	Условная поверхность охлаждения полюсных наконечников S_1, мм²	(17-254)	—	—	$4 \cdot 255 \cdot 330 = 337\,000$
363	Превышение температуры поверхности полюсного наконечника над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta_{п1}$, °C	(17-259)	—	—	$0{,}9\dfrac{5570\dfrac{2 \cdot 330}{1518}+40}{337\,000 \cdot 8{,}27 \cdot 10^{-6}} = 79{,}5$
364	Односторонняя толщина изоляции в пазу $b_{и1}$, мм	(17-255)	—	—	$\dfrac{8{,}4-1 \cdot 5{,}6}{2} = 1{,}4$
365	Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза $П_1$, мм	(17-255)	—	—	$2(8{,}4+38{,}9) = 94{,}6$
366	Условная поверхность охлаждения обмотки в пазах S_2, мм²	(17-255)	—	—	$4 \cdot 12 \cdot 91{,}6 \cdot 330 = 1\,500\,000$
367	Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки $\Delta\vartheta_{и1}$, °C	(17-260)	—	—	$0{,}9\dfrac{5570\dfrac{2 \cdot 330}{1518}}{1\,500\,000}\,\dfrac{1{,}4}{16 \cdot 10^{-6}} = 12{,}9$
368	Условная поверхность охлаждения лобовых частей обмотки S_3, мм²	(17-261)	—	—	$4 \cdot 12 \cdot 429(2 \cdot 7{,}6+37{,}6) = 1\,079\,000$
369	Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta_{п.л1}$, °C	(17-261)	—	—	$\dfrac{5570(2 \cdot 429/1518)}{1\,079\,000 \cdot 8{,}27 \cdot 10^{-6}} = 35{,}2$
370	Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки $\Delta\vartheta_{и.л1}$, °C	(17-262)	—	—	$\dfrac{5570(2 \cdot 429/1518)}{1\,079\,000}\,\dfrac{0{,}9}{16 \cdot 10^{-6}} = 16{,}5$
371	Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta'_1$, °C	(17-263)	—	—	$(79{,}5+12{,}9)\dfrac{2 \cdot 330}{1518}+(35{,}2+16{,}5)\times \dfrac{2 \cdot 429}{1518} = 69{,}2$

372	Среднее превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды $\Delta\theta_1$, °C	(17-264)	—	—	$69,2 + 12,3 = 81,5$

c) Коллектор

373	Условная поверхность охлаждения коллектора $S_к$, мм²	(17-265)	$3,14 \cdot 125 \cdot 51 = 20\,000$	80 000	190 000
374	Превышение температуры наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри двигателя $\Delta\vartheta'_к$, °C	(17-265)	$\frac{78,4 + 38,5}{20\,000 \cdot 16 \cdot 10^{-5}} = 36,5$	54,9	37,5
375	Превышение температуры коллектора над температурой охлаждающей среды при входе воздуха со стороны коллектора $\Delta\theta_к$, °C	(17-266)	39,8	67,9	—
376	То же при входе воздуха со стороны, противоположной коллектору, $\Delta\theta_к$, °C	(17-267)	—	—	$38 + 2 \cdot 12,3 = 62,3$

14. Расчет аксиальной системы самовентиляции

377	Необходимое количество охлаждающего воздуха $Q_в$, м³/с	(17-259)	$\frac{1356}{1100 \cdot 2 \cdot 9,3} = 0,066$	0,28	—
378	Наружный диаметр лопаток центробежного вентилятора у двигателей без аксиальных вентиляционных каналов (округленный) $D_{вент}$, мм	(17-274)	$0,9 \cdot 270 = 243 \approx 245$	—	—
379	То же у двигателей с аксиальными вентиляционными каналами (округленный) $D_{вент}$, мм	(17-275)	—	$0,9 \cdot 420 = 378 \approx 380$	—

Продолжение табл. 18-5

№ п/п.	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные и принятые параметры для двигателей № 1	№ 2	№ 3
380	Внутренний диаметр лопаток центробежного вентилятора у двигателей без аксиальных вентиляционных каналов (округленный) $D_{вен}$, мм	(17-276)	$1,25 \cdot 160 = 200$	—	—
381	То же у двигателей с аксиальными вентиляционными каналами (округленный) $D_{вен}$, мм	(17-277)	—	$1,15 \cdot 258 \approx 295$	—
382	Длина лопатки вентилятора $l_л$, мм	(17-278)	$0,15 \cdot 245 = 36,5 \approx 40$	50	—
383	Число лопаток вентилятора, округленное до ближайшего простого числа $N_л$	(17-279)	$\frac{245}{20} = 12,25 \approx 13$	19	—
384	Окружная скорость по наружному диаметру лопаток $v_{вен}$, м/с	(17-280)	$\frac{3,14 \cdot 245 \cdot 1500}{6 \cdot 10^4} = 19,3$	29,9	—
385	Окружная скорость по внутреннему диаметру лопаток $v_{вен}$, м/с	(17-280)	$\frac{3,14 \cdot 200 \cdot 1500}{6 \cdot 10^4} = 15,7$	25,2	—
386	Напор вентилятора (при $Q_в = 0$) H_0, Па	(17-280)	$0,6 \cdot 1,23 (19,3^2 - 15,7^2) = 96$	265	—
387	Площадь входного поперечного сечения вентилятора $Q_{вен}$, м²	(17-281)	$0,92 \cdot 3,14 \cdot 245 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 0,0283$	0,066	—
388	Максимальный возможный расход, обеспечиваемый вентилятором, $Q_{в.макс}$, м³/с	(17-281)	$0,42 \cdot 19,3 \cdot 0,0283 = 0,227$	0,81	—
389	Действительный расход воздуха $Q_в$, м³/с	(17-272)	$0,227 \sqrt{\frac{96}{96 + 17\,700 \cdot 0,227^2}} = 0,0695$	0,28	—
390	Действительный напор H, Па	(17-273)	$\frac{96 \cdot 1830 \cdot 0,227^2}{96 + 17\,700 \cdot 0,227^2} = 86,5$	234	—
391	Мощность, потребляемая вентилятором, $P_{вен}$, Вт	(17-282)	$\frac{86,5 \cdot 0,0695}{0,15} = 4$	41	—

	15. Расчет независимой вентиляции				
392	Необходимое количество воздуха $Q_в$, $м^3/с$	(17-283)	—	—	$0,043\cdot 22\,475\cdot 10^{-6}=0,97$
393	Требуемый напор H, Па	(17-284)	—	—	$304\cdot 0,97^2=285$
	16. Регулирование частоты вращения				
394	Магнитный поток при максимальной частоте вращения $\Phi_{макс}$, Вб	(17-285)	$6,88\cdot 10^{-3}\dfrac{1500}{3000}=3,44\cdot 10^{-3}$	$17,45\cdot 10^{-3}$	$27,8\cdot 10^{-3}$
395	Минимальная м. д. с. параллельной обмотки возбуждения $F_{ш.мин}$, А	(17-286), рис. 18-1—18-3, 18-5	$600-274=326$	956	1440
396	Минимальный ток параллельной обмотки возбуждения $I_{ш.мин}$, А	(17-287)	$\dfrac{326}{1480}=0,22$	1,5	1,4
397	Максимальное значение регулируемого сопротивления $r_р$, Ом	(17-288)	$1,3\left(\dfrac{220}{0,22}-169\right)=1080$	143	337
398	Допустимый момент вращения на валу при минимальной частоте вращения M_2, Н·м	Рис. 17-56	$0,86\cdot 47,8=41$	326	3830
399	Магнитный поток при минимальной частоте вращения Φ, Вб	§ 17-16	$\sqrt{0,86}\cdot 6,88\cdot 10^{-3}=6,37\cdot 10^{-3}$	$21,1\cdot 10^{-3}$	$83,4\cdot 10^{-3}$
400	Ток в якоре при минимальной частоте вращения I_2, А	§ 17-16	$\sqrt{0,86}\cdot 39,2=36,3$	307	500
401	Э. д. с. якоря при минимальной частоте вращения $E_{2мин}$, В	(17-289)	$\dfrac{6,37\cdot 10^{-3}\cdot(2/1)\cdot 500\cdot 290}{30}=61,5$	34,2	40
402	Напряжение на якоре при минимальной частоте вращения $U_{мин}$, В	(17-289)	$61,5+36,3\cdot 0,4676-2=80,4$	44,9	75,6
	17. Динамические параметры				
403	Приближенное значение динамического момента инерции якоря J, кг·м²	(17-290)	$0,67\cdot 160^4(130+0,3\cdot 160+0,75\times 7,5)10^{-12}=0,081$	1,19	25

Продолжение табл. 18-5

№ п/п	Параметр	Формула, рис., табл. или параграф	Вычисленные или принятые параметры для двигателей: № 1	№ 2	№ 3
404	Электротехническая постоянная времени двигателя $T_м$, с	(17-291)	$\frac{0,081\cdot 0,468}{91(199/1500)}=0,00315$	0,00269	0,0229
405	Приближенное значение индуктивности обмоток якорной цепи L_a, Г	(17-293)	$0,6\frac{220}{39,2}\cdot\frac{30}{3,14\cdot 1500\cdot 2}=0,0107$	0,00112	0,00128
406	Электромагнитная постоянная времени обмоток якорной цепи $T_{эа}$, с	(17-292)	$\frac{0,0107}{0,468}=0,0228$	0,0396	0,019
			18. Масса двигателя		
407	Масса изолированных проводов круглого поперечного сечения обмотки якоря $G_{мa}$, кг	(17-296)	$\left[7,55+1,35\left(\frac{1,485}{1,4}\right)^2\right]290\times$ $\times 596\cdot 2\times 1,539\cdot 10^{-5}=4,82$	—	—
408	То же прямоугольного поперечного сечения $G_{мa}$, кг	(17-297)	—	$\left(7,55-1,35\frac{17,5}{16,15}\right)81\cdot 1100\times$ $\times 2\cdot 16,15\cdot 10^{-6}=26,15$	77,6
409	Масса изолированных проводов круглого поперечного сечения обмотки возбуждения $G_{м\,ш}$, кг	(17-299)	$\left[7,55+1,35\left(\frac{0,7}{0,61}\right)^2\right]4\times$ $\times 1480\cdot 430\times 0,322\cdot 10^{-6}=7,7$	24,8	100
410	Масса изолированных проводов прямоугольного поперечного сечения обмотки добавочных полюсов $G_{м.д}$, кг	(17-302)	$\left(7,55+1,35\frac{11,1}{10,08}\right)4\cdot 45\times$ $\times 378\times 10,08\cdot 10^{-6}=6,43$	32,3	42,4
411	Масса голых проводов обмотки добавочных полюсов $G_{м.д}$, кг	(17-303)	—	$8,9\cdot 4\cdot 13\cdot 740\cdot 94,5\cdot 10^{-6}=$ $=32,3$	42,4
412	Масса изолированных проводов прямоугольного поперечного сечения последовательной обмотки возбуждения $G_{м\,с}$, кг	(17-305)	$\left(7,55+1,35\frac{11,1}{10,08}\right)4\cdot 7\times$ $\times 408\times 10,08\cdot 10^{-6}=1,08$	—	—

413	Масса голых проводов последовательной обмотки возбуждения $G_{м.с}$, кг	(17-306)	—	$8,9\cdot 4\cdot 2\cdot 809\cdot 94,5\cdot 10^{-6}=5,4$	—
414	Масса голых проводов секционной компенсационной обмотки $G_{м1}$, кг	(17-308)	—	—	$8,9\cdot 4\cdot 12\cdot 1490\cdot 5\cdot 17,09\times 10^{-6}=56,5$
415	Масса коллекторной меди $G_{м.к}$, кг	(17-309)	$5,25\cdot 125^{1,5}\cdot 51\cdot 10^{-6}=3,75$	22,2	59,7
416	Суммарная масса проводов обмоток и коллекторной меди $\Sigma G_{м}$, кг	(17-310)	$4,82+7,7-6,43+1,08+3,75=23,78$	110,74	336
417	Масса стали сердечников главных полюсов двигателей без компенсационной обмотки $G_{т}$, кг	(17-311)	$8,5\cdot 4\cdot 127,5\cdot 52\cdot 38,5\times 10^{-6}=8,67$	48,3	—
418	То же двигателей с компенсационной обмоткой $G_{п}$, кг	(17-312)	—	—	$7,8\cdot 4\cdot 324(1,15\cdot 113\cdot 188-12\cdot 330)10^{-6}=208$
419	Масса стали шихтованных сердечников добавочных полюсов $G_{д}$, кг	(17-314)	$7,8\cdot 4\cdot 0,98\cdot 130\cdot 19\cdot 50\times 10^{-6}=3,8$	15,6	37,2
420	Масса массивной станины $G_{с1}$, кг	(17-315)	$6,05\cdot 220(302^2-270^2)\times 10^{-6}=23$	138	—
421	Масса шихтованной станины $G_{с1}$, кг	(17-316)	—	—	$6,45\cdot 0,98\cdot 590(875^2-735^2)10^{-6}=840$
422	Суммарная масса активной стали $\Sigma G_{с}$, кг	(17-317)	$3,48+7,25+8,67+3,8+23=46,2$	266,4	1588
423	Масса изоляции двигателя $G_{и}$, кг	(17-318)	$(3,8\cdot 302^{1,5}+0,2\cdot 302\times 130)10^{-4}=2,78$	6,7	15,7
424	Масса конструкционных материалов двигателя с $h\leqslant 200$ мм $G_{к}$, кг	(17-319)	$(0,7\cdot 302^2\cdot 130+0,9\times 302^3)10^{-6}=33,01$	—	—
425	То же двигателя с $h=225\div 315$ мм $G_{к}$, кг	(17-320)	—	$(0,8\cdot 484^2\cdot 265+1,1\times 484^3)10^{-6}=174,5$	—
426	То же двигателя с $h>315$ мм $G_{к}$, кг	(17-322)	—	—	$(0,9\cdot 875^2\cdot 330+1,2\cdot 875^3)\times 10^{-6}=1030$
427	Масса двигателя $G_{дв}$, кг	(17-323)	$23,78+46,2+2,78+33=105,7$	558	2770

Результаты расчета характеристики

Наименование участка	Расчетная длина силовых линий, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм²	Ф. о. с.	0,50			0,75		
			Ф, Вб	$3,44\cdot10^{-3}$			$5,16\cdot10^{-3}$		
			Коэффициенты	В, Т	Н, А/см	F, А	В, Т	Н, А/см	F, А
Зазор между якорем и главным полюсом	1,6	10 140	$k_\delta = 1,05$	0,339	—	455	0,508	—	682
Зубцы якоря	24,4	3437	$k_з = 2,31$	1,0	1,1	2,68	1,5	6,2	15
Спинка якоря	46,4	3705	—	0,46	0,6	2,78	0,69	0,77	3,57
Сердечник главного полюса	52	4905	$\sigma = 1,2$	0,84	—	—	1,26	3,3	17,2
Зазор между главным полюсом и станиной	0,126	—	—	0,84	—	84,5	1,26	—	127
Станина	120	3520	—	0,585	4,78	57,4	0,877	7,76	93,1
ΣF, А	—	—	—	—	—	602	—	—	938

Результаты расчета характеристики

Наименование участка	Расчетная длина силовых линий, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм²	Ф. о.с.	0,50			0,75		
			Ф, Вб	$12,8\cdot10^{-3}$			$19,2\cdot10^{-3}$		
			Коэффициенты	В, Т	Н, А/см	F, А	В, Т	Н, А/см	F, А
Зазор между якорем и главным полюсом	2,5	34 980	$k_\delta = 1,43$	0,367	—	1050	0,55	—	1570
Зубцы якоря	30,7	12 200 16 150 20 100	$k_з$ 2,14 1,93 1,73	1,05 0,842 0,635	2,7 1,61 0,89	— 5,12 —	1,575 1,26 0,953	28 4,7 2,16	— 25 —
Спинка якоря	83,4	11 668	—	0,545	0,8	6,7	0,817	1,5	12,5
Сердечник главного полюса	76	18 720	$\sigma = 1,2$	0,82	—	—	1,23	3,1	23,7
Зазор между главным полюсом и станиной	0,153	—	—	0,82	—	101	1,23	—	151
Станина	193	12 600	—	0,6	4,88	94,2	0,9	7,98	154
ΣF, А	—	—	—	—	—	1257	—	—	1936

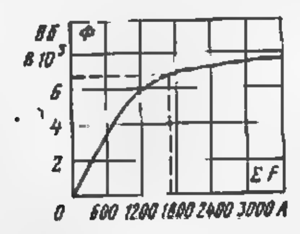


Рис. 18-1. Характеристика намагничивания двигателя № 1.

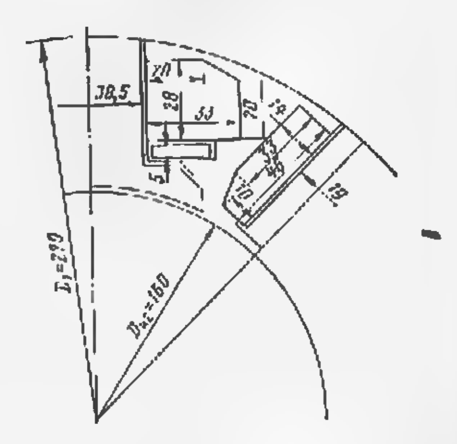


Рис. 18-2. Эскиз междуполюсного окна двигателя № 1.

намагничивания двигателя № 1

0,90			1,00			1,10			1,15		
$6,19 \cdot 10^{-3}$			$6,88 \cdot 10^{-3}$			$7,57 \cdot 10^{-3}$			$7,9 \cdot 10^{-3}$		
B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А
0,61	—	819	0,678	—	910	0,746	—	1001	0,779	—	1048
1,8	70	170	2,0	150	365	2,2	440	1072	2,3	680	1655
0,828	0,91	4,2	0,92	1,01	5	1,01	1,11	5,1	1,06	1,18	5,47
1,51	7,3	38	1,68	18	94	1,85	59	307	1,93	130	675
1,51	—	152	1,68	—	169	1,85	—	186	1,93	—	195
1,05	10	120	1,17	12,3	148	1,29	15,5	186	1,35	18,1	217
—	—	1303	—	—	1691	—	—	2757	—	—	3795

Таблица 18-7

намагничивания двигателя № 2

0,90			1,00			1,10			1,15		
$23,04 \cdot 10^{-3}$			$25,6 \cdot 10^{-3}$			$26,16 \cdot 10^{-3}$			$29,5 \cdot 10^{-3}$		
B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А
0,66	—	1890	0,734	—	2100	0,807	—	2310	0,845	—	2420
1,89	188	—	2,1	660	—	2,31	1400	—	2,42	1820	—
1,515	18	135	1,685	65	474	1,855	167	1060	1,94	257	1460
1,143	3,4	—	1,27	4,8	—	1,4	10	—	1,46	13,6	—
0,981	2,3	19,2	1,09	2,94	24,5	1,2	4	33,4	1,255	4,65	38,8
1,475	6,5	49,3	1,64	14	106	1,8	40	304	1,885	80	608
1,475	—	181	1,64	—	201	1,8	—	220	1,885	—	231
1,08	10,6	204,6	1,2	12,9	249	1,32	16,7	322	1,38	19,7	380
—	—	2479	—	—	3156	—	—	4249	—	—	5138

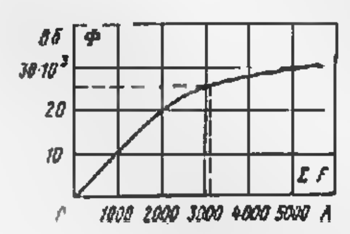


Рис. 18-3. Характеристика намагничивания двигателя № 2.

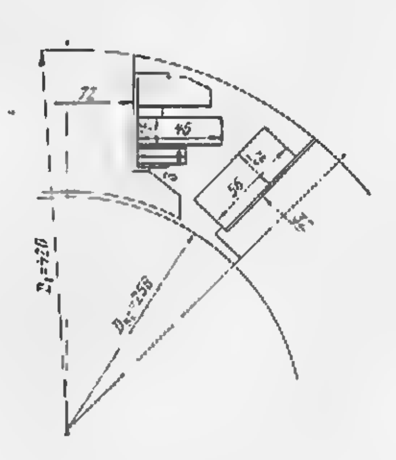


Рис. 18-4. Эскиз междуполюсного окна двигателя № 2.

Результаты расчета характеристики

Наименование участка	Средняя длина силовых линий, мм	Площадь поперечного сечения участка, мм²	Ф, о. е.	0,50			0,75		
			Ф, Вб	$41{,}7\cdot10^{-3}$			$62{,}5\cdot10^{-3}$		
			Коэффициенты	B, Т	H, А/см	F, А	B, Т	H, А/см	F, А
Зазор между якорем и главным полюсом	4	86 800	k_δ 1,31	0,478	—	2100	0,716	—	3000
Зубцы якоря	41,7	36 300	k_{z2} 1,98	1,15	3,44	—	1,725	112	—
		43 400	k_{z2} 1,84	0,987	2,1	9,2	1,48	21,6	141
		50 500	k_{z2} 1,71	0,825	1,39	—	1,21	4,47	—
Спинка якоря	174	33 000	—	0,63	0,96	16,7	0,945	1,85	32,2
Наконечник главного полюса	37,9	52 900	$\sigma_{м\,п} = 1{,}05$	0,825	—	—	1,24	3,2	12,1
Сердечник главного полюса	75,1	60 721	$\sigma = 1{,}2$	0,825	—	—	1,24	3,2	24
Станина	342	34 690	—	0,715	1	34,2	1,07	2,82	96,4
ΣF, А	—	—	—	—	—	2160	—	—	3306

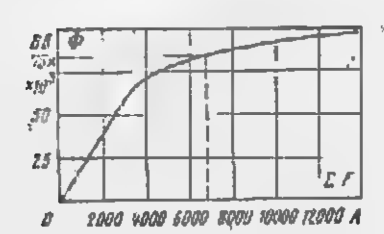


Рис. 18-5. Характеристика намагничивания двигателя № 3.

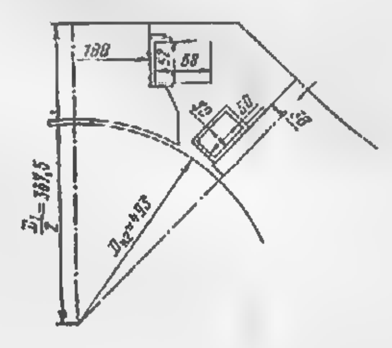
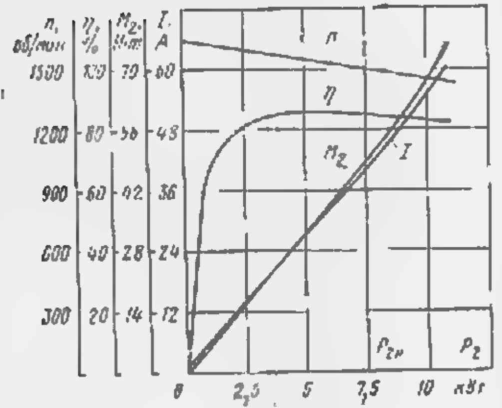


Рис. 18-6. Эскиз междуполюсного окна двигателя № 3.



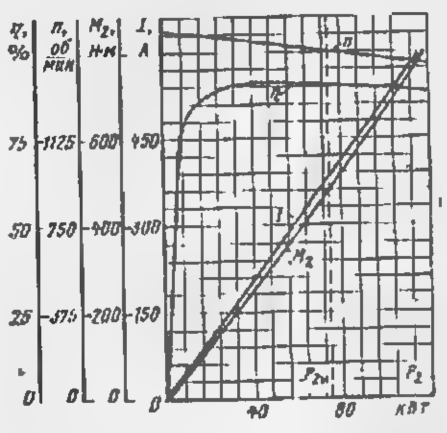


Рис. 18-7. Рабочие характеристики двигателя № 1.

Рис. 18-8. Рабочие характеристики двигателя № 2.

намагничивания двигателя № 3

0,90			1,00			1,10			1,15		
$75\cdot10^{-3}$			$83,4\cdot10^{-3}$			$91,7\cdot10^{-3}$			$96\cdot10^{-3}$		
B, T	H, A/см	F, A	B, T	H, A/см	F, A	B, T	H, A/см	F, A	B, T	H, A/см	F, A
0,86	—	3610	0,957	—	4020	1,05	—	4400	1,1	—	4610
2,07	600	—	2,3	1500	—	2,53	2400	—	2,65	2700	—
1,77	137	810	1,975	380	2170	2,17	1000	4550	2,27	1400	5950
1,48	21,6	—	1,65	88	—	1,81	162	—	1,9	239	—
1,135	3,29	57,2	1,26	4,73	82	1,39	11,5	200	1,45	17,5	304
1,485	6,7	25,4	1,65	15	57	1,815	44	167	1,9	92	348
1,485	6,7	50,2	1,65	15	113	1,815	44	330	1,9	92	690
1,29	5,2	178	1,43	11,8	405	1,57	27	924	1,65	47	1610
—	—	4731	—	—	6847	—	—	10 571	—	—	13 512

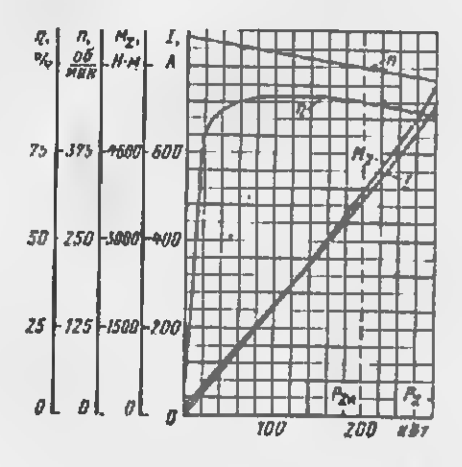


Рис. 18-9. Рабочие характеристики двигателя № 3.

Таблица 18-9

Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 1

Параметр	Формула, рис.	Параметры при k						
		0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
kI_1, А	—	3,92	9,8	19,6	29,4	39,2	49	58,8
E_2, В	(17-223)	216,2	213,4	208,9	204,3	199,6	195,1	190,5
F_{p2}, А	$F_{p2} \sim k$	20	50	99	148	198	248	297
F_c, А	(17-230)	27	68	137	205	274	342	411
ΣF, А	(17-231)	1623	1634	1653	1672	1691	1709	1729
Φ, Вб	Рис. 18-1	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$6,82 \cdot 10^{-3}$	$6,84 \cdot 10^{-3}$	$6,86 \cdot 10^{-3}$	$6,88 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$6,92 \cdot 10^{-3}$
n, об/мин	(17-233)	1640	1620	1580	1540	1500	1460	1420
P_1, Вт	(17-227)	1095	2393	4543	6693	8910	11 033	13 183
$P_{эм}$, Вт	(17-222)	846	2090	4100	6000	7818	9550	11 180
$\Sigma P_{мх}$, Вт	(17-218)	116	116	116	116	116	116	116
ΣP_c, Вт	$\Sigma P_c \sim \Phi^2$	117,5	118,5	119	120	120,5	121	122
$P_д$, Вт	$P_д \sim k^2$	0,89	5,55	22,3	50	89	139	200
P_2, Вт	(17-221)	611,6	1850	3850	5714	7500	9174	10 742
ΣP, Вт	(17-228)	483,4	543	700	979	1410	1859	2441
η, %	(17-229)	55,9	77,3	84,6	85,3	84,2	83,1	81,5
M_2, Н·м	(17-234)	3,57	10,9	23,2	35,5	47,8	60	72,3
I, А	(17-235)	4,98	10,86	20,66	30,46	40,5	50,06	59,86

Таблица 18-10

Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 2

Параметр	Формула, рис.	Параметры при k						
		0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
kI_2, А	—	37,2	93	186	279	372	465	558
E_2, В	(17-223)	216,9	215,4	212,7	210,1	207,5	204,8	202,2
F_{pa}, А	$F_{pa} \sim k$	68	170	340	510	680	850	1020
F_c, А	(17-230)	74,4	186	372	558	744	930	1116
ΣF, А	(17-231)	3093	3103	3119	3135	3151	3167	3183
Φ, Вб	Рис. 18-2	$25{,}4\cdot10^{-3}$	$25{,}45\cdot10^{-3}$	$25{,}5\cdot10^{-3}$	$25{,}55\cdot10^{-3}$	$25{,}6\cdot10^{-3}$	$25{,}65\cdot10^{-3}$	$25{,}7\cdot10^{-3}$
n, об/мин	(17-233)	1580	1560	1540	1520	1500	1480	1460
P_1, Вт	(17-227)	9260	21 390	41 900	62 490	83 140	103 290	123 890
$P_{эм}$, Вт	(17-222)	8070	20 000	39 400	58 500	77 343	95 000	113 000
$\Sigma P_{мх}$, Вт	(17-218)	924	924	924	924	924	924	924
ΣP_c, Вт	$\Sigma P_c \sim \Phi^2$	478	480	481	483	485	487	489
$P_д$, Вт	$P_д \sim k^2$	8,3	52,2	209	458	835	1300	1800
P_2, Вт	(17-221)	6660	18 544	37 786	56 625	75 000	92 289	109 787
ΣP, Вт	(17-228)	2600	2846	4114	5865	8140	11 001	14 103
η, %	(17-229)	71,9	86,7	90,2	90,6	90,2	89,3	88,6
M_2, Н·м	(17-234)	40,4	114	234	356	478	599	720
I, А	(17-235)	42,15	98	191	274	378	470	565

Таблица 18-11

Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 3

Параметр	Формула, рис	Параметры при k						
		0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
kI_1, А	—	50	125	250	375	500	625	750
E_2, В	(17-223)	434,6	429,6	421,2	412,8	404	396	387,7
ΣF, А	(17-231)	6847	6847	6847	6847	6847	6847	6847
Φ, Вб	Рис. 18-3	$83,4 \cdot 10^{-3}$	$83,4 \cdot 10^{-3}$	$83,4 \cdot 10^{-3}$	$83,4 \cdot 10^{-3}$	$83,4 \cdot 10^{-3}$	$83,4 \cdot 10^{-3}$	$83,4 \cdot 10^{-3}$
n, об/мин	(17-233)	540	533	521	510	500	491	480
P_1, Вт	(17-227)	25 564	58 564	113 564	158 564	223 564	278 564	333 564
$P_{эм}$, Вт	(17-222)	21 700	58 700	105 000	154 000	202 423	243 000	291 000
$\Sigma P_{мх}$, Вт	(17-218)	714	714	714	714	714	714	714
$\Sigma P_{ст}$, Вт	$\Sigma P_с \sim \Phi^2$	558	558	558	558	558	558	558
$P_д$, Вт	$P_д \sim k^2$	11,1	69,5	278	622	1110	1730	2500
P_2, Вт	(17-221)	20 417	52 359	103 450	152 106	200 000	244 998	287 228
ΣP, Вт	(17-228)	5147	6205	10 114	16 458	23 564	33 566	46 336
η, %	(17-229)	80,4	89,4	91,1	90,2	89,5	87,9	86,1
M_2, Н·м	(17-234)	362	940	1890	2850	3820	4760	5720
I, А	(17-235)	58,1	133	258	383	508	[illegible]	758

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДИФИКАЦИЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА, ВЫПОЛНЯЕМЫХ НА БАЗЕ ОСНОВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ СЕРИИ

19-1. ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИЙ

В гл. 6 приведен перечень модификаций и специальных исполнений машин постоянного тока, выполняемых на базе двигателей основного исполнения серии.

В модификациях обычно применяется без изменения магнитная система основного исполнения с сохранением числа и размеров полузакрытых пазов якоря и коллекторных пластин; при открытых пазах якоря число и размеры их, а также число и размеры коллекторных пластин могут изменяться. Могут изменяться параметры обмоток якоря, главных и добавочных полюсов.

Специальные исполнения при сохранении параметров магнитной цепи и обмоток могут отличаться от основного исполнения конструкцией отдельных элементов, изоляционными материалами, пропиточными лаками и защитными покрытиями обмоток. Для предохранения от вредных воздействий окружающей среды применяют защитные покрытия сборочных единиц и деталей машин.

Ниже приводится методика расчета генераторов, а также двигателей с последовательным возбуждением как наиболее широко применяемых модификаций двигателей основного исполнения.

19-2. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) Основные размеры генераторов

Генераторы выполняются со смешанным, параллельным и независимым возбуждением.

При проектировании генераторов применяют те же значения α', A_2, B_δ, что и для двигателей. В отличие от двигателей у генераторов ток, А, можно определить по формулам:

при смешанном или параллельном возбуждении

$$I=I_2-I_ш; \qquad (19\text{-}1)$$

при независимом возбуждении

$$I=I_2. \qquad (19\text{-}2)$$

Электродвижущая сила генераторов, В,

$$E_2=U+\Delta U. \qquad (19\text{-}3)$$

Соответственно у генераторов:

при смешанном или параллельном возбуждении

$$k_i=I_2/I=1+I_ш/I; \qquad (19\text{-}4)$$

при независимом возбуждении

$$k_i = 1. \tag{19-5}$$

Коэффициент k_e для генераторов

$$k_e = E/U = 1 + \Delta U/U. \tag{19-6}$$

Приравнивая расчетную мощность генератора, Вт,

$$P'_{\text{г}} = E_2 I_2 = k_e U k_i I = k_e k_i P_{2\text{г}} \tag{19-7}$$

к расчетной мощности двигателя определяем с учетом (19-4) и (19-6) допустимую полезную мощность генератора, приходящуюся на 1 мм длины сердечника якоря, Вт/мм:

$$\frac{P_{2\text{г}}}{l'_2} = \frac{P_1}{l'_2} \frac{(1 - I_{\text{ш}}/I)(1 - \Delta U/U)}{(1 + I_{\text{ш}}/I)(1 + \Delta U/U)}, \tag{19-8}$$

где P_1/l'_2 — допустимая подводимая мощность двигателя, приходящаяся на 1 мм длины сердечника якоря при тех же степенях защиты и способах охлаждения, а также частоте вращения, — из рис. 17-8,а $I_{\text{ш}}/I$ и $\Delta U/U$ — из рис. 17-22 и 17-23. Правая часть выражения (19-8) дополнительно умножается на отношение $n_{\text{г}}/n$, если частота вращения генератора $n_{\text{г}}$ не совпадает с частотой вращения двигателя n, указанной на рис. 17-8. При независимом возбуждении множитель $(1 + I_{\text{ш}}/I)$ равен единице.

Проектирование генератора может производиться с использованием длины сердечника якоря двигателя и с определением при этом допустимой для генератора полезной мощности, Вт,

$$P_{2\text{г}} = l_2 P_{2\text{г}}/l'_2. \tag{19-9}$$

Размеры участков магнитной цепи, а следовательно, и характеристика намагничивания машины принимаются такими же, как у двигателей, на базе которых проектируют генераторы.

При заданной мощности $P_{2\text{г}}$ сохраняется наружный диаметр якоря двигателя, но изменяется длина сердечника якоря, мм,

$$l'_2 = \frac{P_{2\text{г}}}{P_{2\text{г}}/l'_2}. \tag{19-10}$$

В этом случае определяют отношение $\lambda = l_2/D_{\text{н}2}$; целесообразно стремиться к предельно допустимым отношениям λ, указанным на рис. 17-9. При этом может выявиться необходимость перехода на ближайший меньший или больший наружный диаметр якоря двигателя.

Для генераторов с измененной длиной сердечника якоря значения Ф на характеристике намагничивания базового двигателя изменяют пропорционально длине сердечника якоря.

б) Генераторы со смешанным возбуждением

Электромагнитный расчет генератора производят по методике, изложенной в гл. 17, с указанными ниже изменениями.

Допустимую мощность генератора при заданной длине сердечника якоря определяем по (19-8) и (19-9), а при заданной мощности длину сердечника — по (19-10).

В § 17-3 вместо уравнения (17-29) предварительное значение тока якоря, А, находим по формуле

$$I_2 = k_i P_{2т}/U, \qquad (19\text{-}11)$$

где k_i — определяем по (19-4).

В (17-30) подставляем значение k_e из (19-6).

В § 17-7 и 17-9 следует внести изменения, так как в генераторе последовательную и параллельную обмотки рассчитывают исходя из поддержания напряжения возможно близким к номинальному значению при изменении нагрузки.

Магнитный поток при холостом ходе генератора и номинальном напряжении, Вб,

$$\Phi_0 = \frac{30U}{(p/a)\, n w_2}. \qquad (19\text{-}12)$$

Соответствующую этому потоку м. д. с. ΣF_0 определяют по характеристике намагничивания машины.

Уравнения (17-171)—(17-173) исключаются при расчете параллельной обмотки, так как $F_m = F_0$ как для некомпенсированного, так и для компенсированного генератора; $k_{зап}$ в (17-175) принимают равным 1,2. В остальном материалы § 17-9 остаются без изменения.

В § 17-8 магнитный поток Ф, обеспечивающий номинальное напряжение при номинальной нагрузке, определяют по (17-115), подставляя в это уравнение предварительное значение э. д. с., В,

$$E_2 = U + I_2 \Sigma r_2 + \Delta U_{щ}, \qquad (19\text{-}13)$$

где $\Sigma r_2 = (1{,}08 \div 1{,}12)(r_2 + r_д)$.

Магнитодвижущую силу ΣF, соответствующую магнитному потоку Ф, определяют по характеристике намагничивания машины.

Магнитодвижущая сила последовательной обмотки, А,

$$F_c = \Sigma F + F_{р2} - F_0, \qquad (19\text{-}14)$$

где $F_{р2}$ — определяют по (17-172).

Уравнение (17-108) исключается, так как параметры последовательной обмотки определяются из других, указанных выше условий. После вычисления r_c уточняют Σr_2 и E_2; если E_2 будет отличаться более чем на 1% от значения, вычисленного по (19-13), то соответственно корректируют число витков последовательной обмотки.

В § 17-13 уравнения (17-219) и (17-220) исключаются, так как для генератора добавочные потери при номинальной нагрузке, Вт, следует определять по формулам:

у некомпенсированных генераторов

$$P_д = 0{,}01\, P_2; \qquad (19\text{-}15)$$

у компенсированных генераторов

$$P_д = 0{,}005\, P_2. \qquad (19\text{-}16)$$

Уравнения (17-221)—(17-225) исключаются, так как ток генератора, А,

$$I = P_2/U, \qquad (19\text{-}17)$$

а ток в якоре из (19-1)

$$I_2 = I + I_ш. \quad (19\text{-}18)$$

Потери в обмотках якорной цепи, Вт,

$$P_м = I^2{}_2 \Sigma r_2. \quad (19\text{-}19)$$

Потери в контакте щеток, Вт,

$$P_{к\,щ} = \Delta U_щ I_2; \quad (19\text{-}20)$$

$\Delta U_щ$ принимают равным 2 В.

Потери в цепи параллельного возбуждения определяют по (17-226). Уравнения (17-227) и (17-228) исключаются.

Суммарные потери в генераторе, Вт,

$$\Sigma P = P_м + P_{к.щ} + \Sigma P_с + \Sigma P_{мх} + P_{м\,ш} + P_д. \quad (19\text{-}21)$$

Подводимая мощность генератора, Вт,

$$P_1 = P_2 + \Sigma P. \quad (19\text{-}22)$$

Коэффициент полезного действия генератора определяют по (17-229).

Задаваясь значениями $kP_{2г}$, где k — 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,25, вычисляют к. п. д. для каждого из этих значений тем же способом, что и для номинальной мощности, принимая напряжение генератора неизменным. При этом следует принимать $F_{р2}$ (для некомпенсированных генераторов) изменяющимся пропорционально k, а $P_д \approx k^2$ по отношению к значениям при номинальной мощности. После вычислений строится зависимость $\eta = f(P_{2г})$.

Расчеты по § 17-16 и по уравнению (17-334) из § 17-17 исключаются.

в) Генераторы с параллельным и независимым возбуждением

Электромагнитный расчет генератора производится по методу, изложенному в гл. 17 с указанными ниже изменениями.

В § 17-8 вместо уравнения (17-114) э. д. с. для генератора определяют по (19-13), где $\Sigma r_2 = r_2 + r_д$.

Магнитный поток, обеспечивающий номинальное напряжение при номинальной нагрузке, определяют по (17-115), а соответствующую ему м. д. с. ΣF — по характеристике намагничивания машины.

В § 17-9 из (17-171) и (17-173) $F_с$ исключается в связи с отсутствием последовательной обмотки; $k_{зап}$ в (17-175) принимают равным 1,2.

Исключается § 17-7.

В § 17-13 добавочные потери при номинальной нагрузке определяют по (19-15) или (19-16). Уравнения (17-221)—(17-225) исключаются. Ток в якоре при параллельном возбуждении определяют по (19-18), а при независимом возбуждении $I_2 = I$.

Потери в обмотках якорной цепи, в контакте щеток, суммарные потери, подводимую мощность определяют по (19-19)—(19-22), а к. п. д. — по (17-229).

Внешнюю характеристику генератора с параллельным возбуждением можно построить графически или определить аналитически, сделав расчет в следующем порядке.

Задаются несколькими значениями э. д. с. E_2 в пределах 1,1—0,3 от $E_{2н}$; для каждого из них определяют Φ по (17-115) и ΣF по характеристике намагничивания машины. Здесь и далее в обозначениях параметров, вычисленных для номинального режима работы, добавляют индекс «н». Затем производят вычисления для каждого из значений E_2, исходя из условия постоянства частоты вращения.

Ток в якоре, А,

$$I_2 = \frac{E_2 - \Delta U_щ - k_2 \Sigma F}{k_1 k_2 + \Sigma r_2}, \tag{19-23}$$

где $k_1 = F_{р2н}/I_{2н}$; $k_2 = U_н/F_{ш.н}$.

Напряжение из (19-13), В,

$$U = E_2 - I_2 \Sigma r_2 - \Delta U_щ. \tag{19-24}$$

Ток при коротком замыкании ($U=0$) при наличии остаточной э. д. с. $E_{ост2}$, которая обычно составляет 0,05 $U_н$, А,

$$I_{к.з} = (E_{ост2} - \Delta U_щ)/\Sigma r_2. \tag{19-25}$$

Метод расчета к. п. д. при номинальном режиме работы такой же, как у генераторов со смешанным возбуждением. При расчете зависимости $\eta = f(P_2)$ для каждого значения I_2, полученного по (19-23) и U — по (19-24) при расчете внешней характеристики, определяют:

ток в параллельной обмотке возбуждения, А,

$$I_ш = I_{ш\,н} U/U_н; \tag{19-26}$$

ток генератора, А,

$$I = I_2 - I_ш; \tag{19-27}$$

потери в стали, Вт,

$$\Sigma P_с = \Sigma P_{с.н} (\Phi/\Phi_н)^2; \tag{19-28}$$

добавочные потери, Вт,

$$P_д = P_{д.н} (I/I_н)^2. \tag{19-29}$$

Механические потери $\Sigma P_{мх}$ принимают постоянными и равными потерям при номинальном режиме. Значения $P_м$ определяют по (19-19), $P_{к.гщ}$ — по (19-20), $P_{м\,т}$ — по (17-226), ΣP — по (19-21), $P_2 = UI$, P_1 — по (19-22), η — по (17-229).

При определении внешней характеристики генератора с независимым возбуждением методом расчета задаются значениями тока $kI_н$, где $k=0,1$; 0,25; 0,5; 0,75; 1,25 и для каждого из них вычисляют $F_{р2} = F_{р2н}/I_н$; $F_с = F_{с.н} I/I_н$; $\Sigma F = F_ш - F_{р2} + F_с$; Φ — находят по характеристике намагничивания машины.

Электродвижущая сила, В,

$$E_2 = (p/a) w_2 \Phi / 30\, n. \tag{19-30}$$

Напряжение определяют по (19-24).

Метод расчета к. п. д. генератора с независимым возбуждением при номинальной и частичной нагрузках такой же, как у генераторов со смешанным возбуждением, с учетом того, что здесь $I = I_2$.

При проектировании двигателей с последовательным возбуждением принимают те же значения α', A_2, B_δ, P_1/I'_2, что и для двигателей основного исполнения. Как и у генераторов, характеристика намагничивания машин принимается такой же, как у двигателей основного исполнения. Электромагнитный расчет производится по методике, изложенной в гл. 17, с указанными ниже изменениями.

В § 17-3 в уравнении (17-29) у двигателей с последовательным возбуждением $k_i=1$ или $I_2=I$. В уравнении (17-30) при определении k_e значение $\Delta U/U$ из рис. 17-23 увеличивают в 1,3—1,4 раза.

В § 17-7 уравнение (17-108) исключается; м. д. с. последовательной обмотки, А,

$$F_c=\Sigma F+F_{p2}, \tag{19-31}$$

где м. д. с. ΣF, соответствующая $\Phi_{2\text{предв}}$, определяют по характеристике намагничивания машины, а F_{p2} — по (17-172).

Плотность тока J_c принимают при изолированных проводах как для обмотки добавочных полюсов, из рис. 17-33,*а*, *б*, *д*—*з*, а при неизолированных — из рис. 17-33,*в*, *г* (со снижением на 25%). При $q_c>$ >25 мм^2 последовательная обмотка выполняется из неизолированной меди, намотанной плашмя в виде двух или четырех шайб на полюсе. Междувитковая изоляция состоит из асбестовой бумаги толщиной 0,3 мм. Средняя длина витка $l_{\text{ср с}}$ рассчитывается по (17-174).

После вычисления r_c уточняют Σr_2 и E_2; если E_2 будет отличаться более чем на 2% от значения, вычисленного по (17-114), то соответственно корректируют число витков последовательной обмотки или числа витков обмоток якоря и добавочных полюсов. В остальном материалы § 17-7 остаются без изменения.

В §17-10 средний коэффициент разбухания по ширине катушки, выполненной из неизолированной меди, намотанной плашмя, принимают равным 1,04. Соответственно размер катушки или ее отдельных участков составляет по ширине, мм,

$$b_к=1{,}04\,N_ш(b+0{,}3). \tag{19-32}$$

В § 17-13 уравнение (17-226) исключается. Вместо уравнения (17-227) подводимая мощность двигателя, Вт,

$$P_1=UI. \tag{19-33}$$

Вместо (17-231) и (17-232) результирующая м. д. с., А, определяется по следующим уравнениям:

у некомпенсированных двигателей

$$\Sigma F=F_c-F_{p2}; \tag{19-34}$$

у компенсированных двигателей

$$\Sigma F=F_c. \tag{19-35}$$

Расчет рабочих характеристик ведется для значений I, равных 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,25 $I_н$; здесь и далее в обозначениях параметров, вычисленных для номинального режима работы, добавляют индекс «н». Для каждого значения тока вычисляют E_2 по (17-114); $F_c=F_{cн}I/I_н$;

$F_{р2} = F_{р2н} I / I_н$; ΣF по (19-34) или (19-35); Φ — по характеристике намагничивания машины;

n — по (17-233); $\Sigma P_{мх}$ — по (17-218); $\Sigma P_с = \Sigma P_{с.н} (\Phi/\Phi_н)^2 (n/n_н)^\beta$; $P_{эм}$ — по (17-222); $P_1 = UI$; $P_2 = P_{эм} - \Sigma P_с - \Sigma P_{мх} - P_д$; ΣP — (17-228); η — по (17-229). Затем строят n и η в зависимости от I или P_2. В остальном материалы § 17-13 остаются без изменения.

В § 17-14 тепловой расчет последовательной обмотки возбуждения производится по методике, принятой для обмотки параллельного возбуждения (с заменой индекса «ш» на «с»); при последовательной обмотке из неизолированных проводов, намотанных плашмя, коэффициент теплоотдачи наружной поверхности катушки α_t из рис. 17-49 увеличивают в 1,2 раза.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Перечень ГОСТ и ОСТ, используемых при проектировании электрических машин

183-74. Машины электрические. Общие технические требования
1494-61. Электротехника. Обозначения основных величин (буквенные)
2479-65. Машины электрические вращающиеся. Формы исполнения и их условные обозначения
4541-70. Машины электрические вращающиеся. Обозначения буквенные установочно-присоединительных и габаритных размеров
7217-66. Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 100 Вт и выше. Методы испытаний
7830-68. Двигатели трехфазные асинхронные мощностью от 110 до 1000 кВт. Ряды номинальных мощностей, напряжений и скоростей вращения
8032-56. Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел
8592-71. Машины электрические. Допуски на установочно-присоединительные размеры
9362-68. Двигатели трехфазные асинхронные мощностью от 110 до 1000 кВт. Технические требования
9435-70. Двигатели трехфазные асинхронные мощностью от 110 до 1000 кВт. Установочно-присоединительные размеры
9632-67. Машины постоянного тока мощностью от 0,13 до 200 кВт. Основные параметры и размеры. Технические требования
10159-69. Машины электрические постоянного тока. Методы испытаний
10683-73. Машины электрические. Номинальные частоты вращения и допускаемые отклонения
11828-75. Машины электрические. Общие методы испытаний
11929-66. Машины электрические и трансформаторы общего и специального назначения. Методы определения шумовых характеристик
12139-74. Машины электрические вращающиеся. Ряд номинальных мощностей
12259-75. Машины электрические. Методы определения расхода охлаждающего воздуха
12327-66. Машины электрические. Остаточные неуравновешенности роторов. Нормы и методы измерений
12379-75. Машины электрические. Методы оценки вибрации
13267-73. Машины электрические и непосредственно соединяемые с ними неэлектрические. Высоты оси вращения
14254-69. Электрооборудование напряжением до 1000 В. Оболочки. Степени защиты
15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды
15543-70. Изделия электротехнические. Исполнения для различных климатических районов. Условия эксплуатации в части воздействия климатических факторов внешней среды
15963-70. Изделия электротехнические для районов с тропическим климатом. Общие технические условия
16352-70. Машины электрические вращающиеся. Виды
16372-70. Машины электрические вращающиеся. Допустимые уровни шума
16921-71. Машины электрические вращающиеся. Допустимые вибрации
17033-71. Материалы электротехнические. Термины и определения
17154-71. Машины электрические вращающиеся. Характеристики, расчетные параметры и режимы работы. Термины и определения
17412-72. Изделия электротехнические для районов с холодным климатом. Общие технические условия
17494-72. Машины электрические напряжением до 1000 В. Степени защиты
17516-72. Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды
18709-73. Машины электрические. Установочно-присоединительные размеры

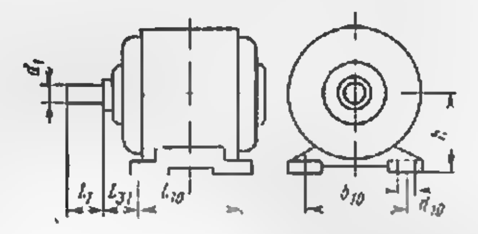
19348-74. Изделия электротехнические сельскохозяйственного назначения. Общие технические условия
19523-74 Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые серии 4А мощностью от 0,06 до 400 кВт. Общие технические условия
19780-74 Коллекторы и кольца контактные электрических машин Ряды диаметров
19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения.
20459-75. Машины электрические вращающиеся Способы охлаждения Обозначения
20529-75. Машины электрические постоянного тока серий 2П мощностью до 200 кВт. Общие технические условия
20815-75. Машины электрические вращающиеся массой свыше 2000 кг. Вибрации. Допустимые значения и методы испытаний
20818-75. Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые серия 4А с повышенным пусковым моментом мощностью от 7,5 до 90 кВт. Общие технические условия
20832-75. Машины электрические вращающиеся массой до 0,5 кг. Допустимые вибрации
20839-75. Машины электрические вращающиеся с высотой оси вращения от 450 до 1000 мм. Установочно присоединительные размеры
16.0.684.012-72. Машины электрические вращающиеся Условные обозначения серий и типов

Шкала мощностей по ГОСТ 12139-74 (в диапазоне от 0,06 до 1000 кВт)

0,06	0,55	4,0	22	90	315
0,09	0,75	5,5	30	110	400
0,12	1,1	7,5	37	132	500
0,18	1,5	11	45	160	630
0,25	2,2	15	55	200	800
0,37	3,0	18,5	75	250	1000

Приложение 3

Высоты оси вращения и связанные с ними установочные размеры электрических машин по ГОСТ 13267-73, ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 20839-75



А. Высоты оси вращения от 56 до 400 мм

h, мм		b_{10}, мм	l_{10}, мм		l_{31}, мм	d_{10}, мм
Номинальное значение	Допуск		Обозначение	Значение		
56	−0,5	90	—	71	36	5,8
63	−0,5	100	—	80	40	7
71	−0,5	112	—	90	45	7
80	−0,5	125	—	100	50	10
90	−0,5	140	S L	100 125	56	10
100	−0,5	160	S L	112 140	63	12
112	−0,5	190	S M L	114 140 159	70	12
132	−0,5	216	S M L	140 178 203	89	12
160	−0,5	254	S M L	178 210 254	108	15
180	−0,5	279	S M L	203 241 279	121	15
200	−0,5	318	S M L	228 267 305	133	19
225	−0,5	356	S M L	286 311 356	149	19
250	−0,5	406	S M L	311 349 406	168	24

h, мм		b_{10}, мм	l_{10}, мм		l_{31}, мм	d_{10}, мм
Номинальное значение	Допуск		Обозначение	Значение		
280	—1,0	457	S M L	368 419 457	190	24
315	—1,0	508	S M L	406 457 508	216	28
355	—1,0	610	S M L	500 560 630	254	28
400	—1,0	686	S M L —	560 630 710 800 900	280	35

В. Высоты оси вращения от 450 до 630 мм

h, мм		b_{10}, мм	l_{10}, мм	d_{10}, мм
Номинальное значение	Допуск			
450	—1,0	710; 800; 900; 1000; 1120	355; 400; 450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1000; 1120; 1250	35
500	—1,0	800; 900; 1000; 1120; 1250	400; 450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1000; 1120; 1250; 1400	42
560	—1,0	900; 1000; 1120; 1250; 1400	450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1000; 1120; 1250; 1400	42
630	—1,0	1000; 1120; 1250; 1400; 1600	500; 560; 630; 710; 800; 900; 1000; 1120; 1250; 1400; 1600	48

Размеры l_{31} (независимо от высоты оси вращения) следует выбирать из ряда: 100; 200; 224; 250; 280; 315; 335; 355; 375; 400; 425; 450; 475; 500; 530; 560; 600; 630; 670; 710; 750; 800; 900 и 1000 мм.

Приложение 4

Размеры выступающего конца вала электродвигателей по ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 20839-75*

Диаметр d_1, мм	Длина l_1, мм	Наибольший момент вращения, Н·м	Диаметр d_1, мм	Длина l_1, мм	Наибольший момент вращения, Н·м
7	16	0,25	75	140	1000
9	20	0,63	80	170	1250
11	23	1,25	85	170	1600
14	30	2,8	90	170	1900
16	40	4,5	95	170	2360
18	40	7,1	100	210	2800
19	40	8,25	110	210	4000
22	50	14	120	210	—
24	50	18	125	210	—
28	60	31,5	130	250	—
32	80	50	140	250	—
38	80	90	150	250	—
42	110	125	160	300	—
48	110	200	170	300	—
55	110	355	180	300	—
60	140	450	190	350	—
65	140	630	200	350	—
70	140	800	220	350	—

* См. рис. к приложению 3.

Примечание. Значения наибольшего момента вращения при номинальном режиме работы — по данным публикации 72 МЭК.

Технические данные асинхронных двигателей серии 4А с короткозамкнутым ротором. Напряжение от 220 до 660 В. Изоляция классов нагревостойкости В (при $h = 50 \div 132$ мм) и F (при $h = 160 \div 355$ мм). $2p = 4$

Высота оси вращения h, мм	Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	η, %	Коэффициент мощности	Отношение к номинальным значениям: моментов — максимального	Отношение к номинальным значениям: моментов — начального пускового	Отношение к номинальным значениям: начального пускового тока	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
	Исполнение по степени защиты IP44. Способ охлаждения — наружный обдув (IC0141)								
50	4АА50А4У3*	0,06	50,0	0,60	2,2	2,0	5,0	3,3	0,00013
50	4АА50В4У3*	0,09	55,0	0,60	2,2	2,0	5,0	3,3	0,00015
56	4АА56А4У3*	0,12	63,0	0,66	2,2	2,0	5,0	4,5	0,00028
56	4АА56В4У3*	0,18	64,0	0,64	2,2	2,0	5,0	4,5	0,00033
63	4АА63А4У3*	0,25	68,0	0,65	2,2	2,0	5,0	6,3	0,00053
63	4АА63В4У3*	0,37	68,0	0,69	2,2	2,0	5,0	6,3	0,0006
71	4А71А4У3	0,55	70,5	0,70	2,2	2,0	4,5	15,1	0,0011
71	4А71В4У3	0,75	72,0	0,73	2,2	2,0	4,5	15,1	0,0012
80	4А80А4У3	1,1	75,0	0,81	2,2	2,0	5,0	17,4	0,0026
80	4А80В4У3	1,5	77,0	0,83	2,2	2,0	5,0	20,4	0,0032
90	4А90L4У3	2,2	80,0	0,83	2,2	2,0	6,0	28,7	0,0053
100	4А100S4У3	3,0	82,0	0,83	2,2	2,0	6,5	35,0	0,0082
100	4А100L4У3	4,0	84,0	0,84	2,2	2,0	6,5	42,0	0,0104
112	4А112М4У3	5,5	85,5	0,85	2,2	2,0	7,0	56,0	0,0205
132	4А132S4У3	7,5	87,5	0,85	2,2	2,0	7,5	77,0	0,0345
132	4А132М4У3	11	87,5	0,87	2,2	2,0	7,5	93,0	0,046
160	4А160S4У3	15	88,5	0,88	2,2	1,4	7,0	135	0,103
160	4А160М4У3	18,5	89,5	0,89	2,2	1,4	7,0	160	0,130
180	4А180S4У3	22	90,0	0,90	2,2	1,4	7,0	175	0,193
180	4А180М4У3	30	90,5	0,90	2,2	1,4	7,0	185	0,240
200	4А200М4У3	37	91,0	0,90	2,2	1,4	7,0	270	0,370
200	4А200L4У3	45	92,0	0,90	2,2	1,4	7,0	310	0,455
225	4А225М4У3	55	92,5	0,90	2,2	1,2	7,0	355	0,65
250	4А250S4У3	75	93,0	0,90	2,2	1,2	7,0	490	1,13
250	4А250М4У3	90	93,0	0,91	2,2	1,2	7,0	535	1,31
280	4А280S4У3	110	92,5	0,90	2,0	1,2	7,0	785	2,3
280	4А280М4У3	132	93,0	0,90	2,0	1,2	7,0	835	2,5
315	4А315S4У3	160	93,5	0,91	1,9	1,0	7,0	875	3,1
315	4А315М4У3	200	94,0	0,92	1,9	1,0	7,0	1100	3,6
355	4А355S4У3	250	94,5	0,92	1,9	1,0	7,0	1420	6,0
355	4А355М4У3	315	94,5	0,92	1,9	1,0	7,0	1670	7,05
	Исполнение по степени защиты IP23. Способ охлаждения — самовентиляция (IC01)								
160	4АН160S4У3	18,5	88,5	0,87	2,1	1,3	6,5	115	0,101
160	4АН160М4У3	22	90,0	0,88	2,1	1,3	6,5	135	0,128
180	4АН180S4У3	30	90,0	0,84	2,2	1,2	6,5	170	0,189
180	4АН180М4У3	37	90,5	0,89	2,2	1,2	6,5	190	0,235
200	4АН200М4У3	45	91,0	0,89	2,2	1,2	6,5	260	0,36
200	4АН200L4У3	55	92,0	0,89	2,2	1,2	6,5	315	0,45
225	4АН225М4У3	75	92,5	0,89	2,2	1,2	6,5	355	0,64
250	4АН250S4У3	90	93,5	0,89	2,2	1,2	6,5	445	0,92
250	4АН250М4У3	110	93,5	0,89	2,2	1,2	6,5	495	1,01
280	4АН280S4У3	132	93,0	0,89	2,0	1,2	6,5	715	1,32
280	4АН280М4У3	160	93,5	0,90	2,0	1,2	6,5	825	2,12
315	4АН315S4У3	200	94,0	0,91	2,0	1,0	6,5	860	3,15
315	4АН315М4У3	250	94,0	0,91	2,0	1,0	7,0	940	3,70
355	4АН355S4У3	315	94,5	0,91	2,0	1,0	7,0	1200	5,75
355	4АН355М4У3	400	94,5	0,91	2,0	1,0	7,0	1350	7,0

* Станина и щиты из алюминиевого сплава.

Приложение 6

Технические данные асинхронных двигателей серии А2. Исполнение по степени защиты IP23. Способ охлаждения — самовентиляция (IC01). Напряжение 6000 В. Изоляция класса нагревостойкости В. $2p = 4$

Высота оси вращения h, мм	Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	η, %	Коэффициент мощности	Отношение к номинальным значениям: моментов максимального	моментов начального пускового	начального пускового тока	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²	Ротор: Напряжение на кольцах, В	Ротор: Ток, А
	Двигатели с короткозамкнутым ротором										
450	А2-450S-4	400	94,0	0,890	2,0	1,0	5,6	2140	11,3	—	—
450	А2-450М-4	500	94,4	0,895	2,0	1,1	5,7	2370	12,5	—	—
500	А2-500S-4	630	94,6	0,900	2,1	1,0	6,2	2780	21,3	—	—
500	А2-500М-4	800	95,0	0,900	2,2	1,2	6,7	3110	26,1	—	—
560	А2-560S-4	1000	95,0	0,900	2,1	1,0	6,0	3670	42,5	—	—
560	А2-560М-4	1250	95,3	0,905	2,2	1,1	6,6	4100	51,2	—	—
	Двигатели с фазным ротором										
450	АК2-450S-4	400	93,5	0,890	2,0	—	—	2260	13,8	550	455
450	АК2-450М-4	500	93,8	0,895	2,0	—	—	2490	15	650	480
500	АК2-500S-4	630	94,1	0,900	2,2	—	—	2930	26,3	715	545
500	АК2-500М-4	800	94,7	0,900	2,4	—	—	3300	31,3	895	550
560	АК2-560S-4	1000	94,8	0,905	2,3	—	—	3850	52,5	895	690
560	АК2-560М-4	1250	95,0	0,910	2,4	—	—	4300	61,3	1100	695

Приложение 7

Технические (предварительные) данные двигателей постоянного тока серии 2П. Номинальная частота вращения 1500 об/мин. Напряжение 220 В. Изоляция классов нагревостойкости В (при $h = 90 \div 120$ мм) и F (при $h = 225 \div 315$ мм)

Высота оси вращения h, мм	Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса двигателя, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
	Исполнение по степени защиты IP22. Способ охлаждения — самовентиляция (IC01)				
90	2ПН90М	0,37	4300	24	0,004
90	2ПН90L	0,55	4300	27	0,005
100	2ПН100М	0,75	4300	36	0,011
100	2ПН100L	1,1	4300	39	0,012
112	2ПН112М	1,5	4000	47	0,015
112	2ПН112L	2,2	4000	56	0,018
132	2ПН132М	4,0	4000	86	0,038
132	2ПН132L	5,5	4000	96	0,048
160	2ПН160М	7,5	4000	141	0,083
160	2ПН160L	11,0	4000	159	0,105
180	2ПН180М	15,0	4000	213	0,200
180	2ПН180L	18,5	3500	234	0,225
200	2ПН200М	22	3500	282	0,25
200	2ПН200L	30	3500	325	0,30

Высота оси вращения h, мм	Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса двигателя, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
225	2ПН225M	37	2600	340	0,53
225	2ПН225L	45	2600	400	0,60
250	2ПН250M	55	2600	510	1,05
250	2ПН250L	75	2600	600	1,29
280	2ПН280M	110	2250	740	2,20
280	2ПН280L	132	2250	820	2,33
315	2ПН315M	160	2250	950	4,18
315	2ПН315L	200	2250	1180	4,53

Исполнение по степени защиты IP22. Способ охлаждения — от пристроенного вентилятора с приводным асинхронным двигателем (IC06)

132	2ПФ132M	4	—	98	0,038
132	2ПФ132L	5,5	—	108	0,048
160	2ПФ160M	7,5	—	153	0,083
160	2ПФ160L	11	—	171	0,105
180	2ПФ180M	15	—	236	0,200
180	2ПФ180L	18,5	—	257	0,225
200	2ПФ200M	22	—	303	0,25
200	2ПФ200L	30	—	346	0,3

Исполнение по степени защиты IP44. Способ охлаждения — наружный обдув пристроенным вентилятором с приводным асинхронным двигателем (IC0641)

132	2ПО132M	2,8	—	100	0,038
132	2ПО132L	3,4	—	110	0,048
160	2ПО160M	6,0	—	151	0,083
160	2ПО160L	7,1	—	169	0,105
180	2ПО180M	10	—	235	0,20
200	2ПО200M	14	—	312	0,25
200	2ПО200L	17	—	355	0,3

Исполнение по степени защиты IP44. Способ охлаждения — естественный (IC0041)

90	2ПБ90M	0,28	—	24	0,004
90	2ПБ90L	0,37	—	27	0,005
100	2ПБ100M	0,6	—	36	0,011
112	2ПБ112M	0,75	—	47	0,015
112	2ПБ112L	1,0	—	56	0,018
132	2ПБ132M	2,4	—	86	0,038
132	2ПБ132L	3,2	—	96	0,048
160	2ПБ160M	4,2	—	111	0,083
160	2ПБ160L	5,3	—	139	0,105
180	2ПБ180M	7,1	—	221	0,200
180	2ПБ180L	8,5	—	242	0,225
200	2ПБ200L	11	—	325	0,3

Примечание. Двигатели типов 2ПФ и 2ПО являются прогрессивными в практике современного электропривода, так как они допускают постоянство вращающего момента при широком диапазоне регулирования частоты вращения. Расчет двигателей 2ПФ соответствует расчету двигателей со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01, а расчет двигателей 2ПО — расчету двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141.

Технические данные (предварительные) двигателей постоянного тока серии 2П с компенсационной обмоткой. Исполнение по степени защиты IP22. Способ охлаждения — независимая вентиляция (IC06). Номинальное напряжение 440 В при мощности до 500 кВт включительно и 600 В при мощности более 500 кВт. Изоляция класса нагревостойкости F

Высота оси вращения h, мм	Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	К. п. д. η, %	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса двигателя, кг	Динамический момент инерции, кг·м²	Необходимое количество воздуха, м³/с
355	2П3512Л	110	800	89,5	1800	2350	5,8	0,9
355	2П3524Л	160	800	90,5	1800	2400	6,8	0,9
355	2П3534Л	200	800	91,0	1650	2620	7,8	0,9
400	2П4014Л	200	630	91,5	1600	2760	13,0	1,3
400	2П4024Л	250	630	92,0	1600	3120	14,7	1,3
400	2П4036Л	315	630	92,5	1250	3020	17	1,3
400	2П4046Л	400	630	93,0	1000	4340	20	1,3
450	2П4514Л	250	500	90,5	1500	3860	29	1,8
450	2П4526Л	315	500	91,0	1250	4020	32	1,8
450	2П4536Л	400	500	91,5	1250	5000	37	1,8
450	2П4548Л	500	500	92,0	1000	5720	40	1,8
500	2П5016Л	315	400	90,5	1500	4700	65	2,5
500	2П5026Л	400	400	91,0	1250	5500	74	2,5
500	2П5038Л	500	400	91,5	1000	6400	86	2,5
500	2П5048Л	630	400	92,0	1000	7500	101	2,5
630	2П6316Л	500	315	90,5	1000	9000	200	4,0
630	2П6326Л	630	315	91,5	800	10 500	225	4,0
630	2П6338Л	800	315	92,0	800	12 000	250	4,0
630	2П6348Л	1000	315	92,5	630	13 500	277	4,0

Приложение 9

Технические данные двигателей постоянного тока серии П. Номинальная частота вращения 1500 об/мин. Напряжение 220 В. Изоляция класса нагревостойкости А (при $h = 112 \div 150$ мм), В (при $h = 160 \div 225$ мм), F (при $h = 250 \div 400$ мм)

Высота оси вращения h, мм	Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	К. п. д. η, %	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса двигателя, кг	Динамический [redacted] ции, кг·м²
Исполнение по степени защиты IP22. Способ охлаждения — самовентиляция (IC01)						
112	П11	0,30	66,0	3000	18,5	0,0031
112	П12	0,45	70,0	3000	23,5	0,0038
140	П21	0,70	72,0	3000	37,8	0,011
140	П22	1,0	76,5	3000	43,8	0,013
150	П31	1,5	79,0	3000	54,5	0,023
150	П32	2,2	82,0	3000	67,5	0,029
160	П41	3,2	78,5	3000	78	0,038
160	П42	3,8	80,5	3000	88	0,045
180	П51	6	81,5	2250	115	0,09
180	П52	8	84,0	2250	135	0,1
225	П61	11	86,0	2250	165	0,14
225	П62	14	87,5	2250	182	0,16
250	П71	19	84,0	2250	306	0,35
250	П72	25	86,0	2250	346	0,4
280	П81	32	84,5	2250	395	0,7
280	П82	42	86,5	2250	430	0,8
315	П91	55	87,0	2250	560	1,5
315	П92	75	89,5	1900	660	1,9

Высота оси вращения h, мм	Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	К. п. д. η, %	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса двигателя, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
355	П101	100	89,5	1800	830	2,6
355	П102	125	90,0	1800	950	3,0
400	П111	160	90,0	1800	1150	5,1
400	П112	200	91,0	1500	1340	5,9
Исполнение по степени защиты IP44. Способ охлаждения — естественный (IC0041)						
112	ПБ11	0,15	68,0	2000	18,5	0,0031
112	ПБ12	0,23	70,0	2000	23,5	0,0038
140	ПБ21	0,35	72,0	2000	37,8	0,011
140	ПБ22	0,50	75,5	2000	43,8	0,013
150	ПБ31	0,65	79,0	2000	54,5	0,023
150	ПБ32	1,0	82,5	2000	67,5	0,029
160	ПБ41	1,2	81,0	2000	78	0,038
160	ПБ42	1,5	81,0	2000	88	0,045
180	ПБ51	1,9	83,5	2000	115	0,09
180	ПБ52	2,4	83,0	2000	135	0,1
225	ПБ61	3,2	85,5	2000	165	0,14
225	ПБ62	4,0	85,5	2000	182	0,16
250	ПБ71	6,0	84,0	2000	306	0,35
250	ПБ72	7,7	85,0	2000	346	0,4
280	ПБ81	8,0	85,0	1500	395	0,7
280	ПБ82	10,0	85,0	1500	430	0,8
Исполнение по степени защиты IP44. Способ охлаждения — наружный обдув (IC0141)						
112	ПО11	0,2	55	2200	18,5	0,0031
112	ПО12	0,3	69	2200	23,5	0,0038
140	ПО21	0,45	70	2200	37,8	0,011
140	ПО22	0,7	73	2200	43,8	0,013
150	ПО31	1,0	74	2200	54,5	0,023
150	ПО32	1,5	76	2200	67,5	0,029
160	ПО41	1,9	77	2200	78	0,038
160	ПО42	2,3	80	2200	88	0,045

Приложение 10

Технические данные двигателей постоянного тока серии П с компенсационной обмоткой. Исполнения по степени защиты IP22, IP44. Способ охлаждения — независимая вентиляция (IC17, IC37). Изоляция класса нагревостойкости В

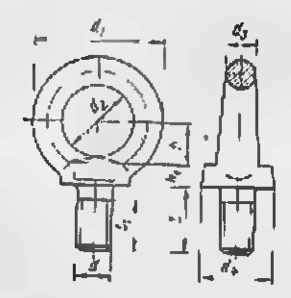
Высота оси вращения, мм	Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	К. п. д. η, %	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса двигателя, кг	Динамический момент инерции, кг·м²	Необходимое количество воздуха, м³/с
500	П131-4К	100	500	89,0	1500	2390	15	0,5
500	П132-4К	100	400	89,0	1500	2705	18	0,5
500	П133-4К	100	300	87,7	1500	3120	21	0,7
500	П131-4К	125	750	90,3	—	2390	15	0,7
500	П132-4К	125	500	90,5	1500	2705	18	0,6
500	П133-4К	125	400	89,7	1500	3120	21	0,7
500	П133-4К	160	500	91,0	1500	3120	21	0,7

Высота оси вращения, мм	Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	К. п. д., %	Максимальная частота вращения, об/мин	Масса двигателя, кг	Динамический момент инерции, кг·м²	Необходимое количество воздуха, м³/с
500	П132-4К	240	1000	92,5	1500	2705	18	0,9
600	П142-4К	125	300	88,0	1500	3680	37	0,9
600	П142-4К	160	400	89,4	1500	3680	37	0,9
600	П143-4К	160	300	89,0	1500	4245	43	1,1
600	П142-4К	200	500	90,5	1200	3680	37	1,1
600	П143-4К	200	400	90,4	1200	4245	43	1,1
600	П143-6К	250	500	90,7	1000	4320	45	1,2
600	П151-5К*	320	500	91,2	1000	5405	93	1,6
600	П152-5К*	320	400	91,0	1000	5970	104	1,6
600	П153-5К*	320	300	90,5	1000	7100	125	1,7
600	П153-5К*	400	400	91,2	1000	7100	125	2,0

* Со стояковыми подшипниками, на фундаментной плите.

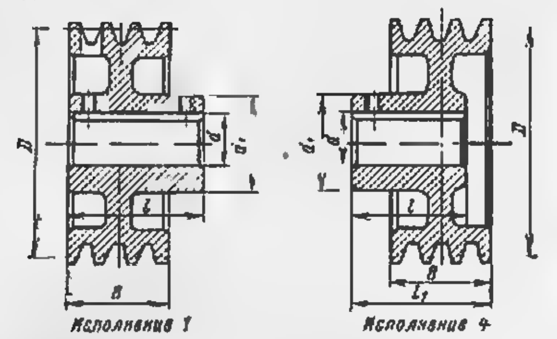
Приложение 11

Размеры, масса и грузоподъемность рым-болтов (ГОСТ 4761-73)



Условное [redacted] резьбы d	Размеры, мм								Масса, кг	Грузоподъемность, Н
	d_1	d_2	d_3	d_4	h	h_1	l	l_1 (не менее)		
М8	36	20	8	20	12	6	18	12	0,05	1200
М10	45	25	10	25	16	8	21	15	0,12	2000
М12	54	30	12	30	18	10	25	19	0,19	3000
М16	63	35	14	36	20	12	32	25	0,31	5500
М20	72	40	16	40	24	14	38	29	0,50	8500
М24	90	50	20	50	29	16	45	35	0,87	12 500
М30	108	60	24	63	37	18	55	44	1,58	20 000
М36	126	70	28	75	43	22	63	51	2,43	30 000
М42	144	80	32	85	50	25	72	58	3,72	40 000
М48	162	90	38	95	52	30	82	68	5,54	50 000
М56	180	100	40	105	80	34	95	78	8,09	62 000

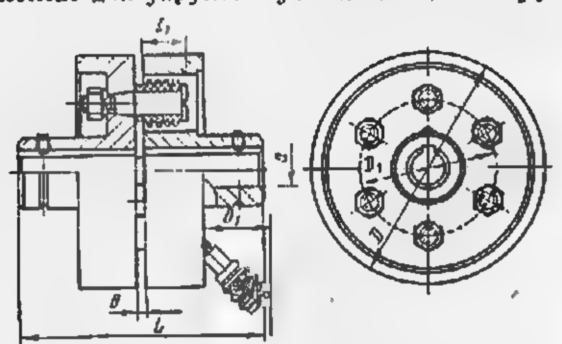
Размеры, масса и динамический момент инерции шкивов для клиновых ремней



Условное обозначение	Размеры, мм						Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²	Число канавок	Тип ремня	Исполнение	Номер нормали машиностроения
	d	D	B	l	l_1	d_1						
121001	14	112	16	30	—	32	1,06	0,0016	1	0	1	МН4437-63
124008	22	112	40	50	56	40	1,71	0,003	3	0	4	МН4437-63
121010	28	112	40	60	—	50	1,95	0,003	3	0	1	МН4437-63
121023	32	125	40	80	—	60	2,81	0,005	3	0	1	МН4437-63
221029	38	140	38	80	—	80	5,4	0,011	4	А	1	МН4440-63
221073	42	200	68	110	—	80	7,81	0,043	4	А	1	МН4440-63
321070	48	224	105	110	—	80	14	0,105	5	Б	1	МН4443-63
324075	55	224	105	110	130	100	15,5	0,109	5	Б	4	МН4443-63
421030	60	250	138	140	—	125	28	0,23	5	В	1	МН4446-63
421031	65	250	138	140	—	125	27,5	0,23	5	В	1	МН4446-63
421051	70	280	164	140	—	125	34,1	0,39	6	В	1	МН4446-63
421052	75	280	164	140	—	125	33,5	0,39	6	В	1	МН4446-63

Приложение 13

Размеры, масса, динамический момент инерции и наибольший крутящий момент для упругих втулочно-пальцевых муфт



Условное обозначение	Размеры, мм							Крутящий момент, Н·м	Частота вращения, об/мин	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
	d	D	L	B	B_1	l_1	D_1				
МУВП1-22	22	100	104	1—4	28	25	68	64	5600	2,14	0,002
МУВП1-28	28	120	125	1—5	42	32	84	127	4750	4,40	0,006
МУВП1-32	32	140	165	1—5	42	32	100	235	4000	7,33	0,014
МУВП1-38	38	140	165	1—5	42	32	100	235	4000	6,97	0,014
МУВП1-42	42	170	226	2—6	55	42	120	440	3350	13,27	0,039
МУВП1-45	45	170	226	2—6	55	42	120	440	3350	12,93	0,039

Условное обозначение	Размеры, мм							Крутящий момент, Н·м	Частота вращения, об/мин	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м²
	d	D	L	D	B_1	l_1	D_1				
МУВП1-48	48	190	226	2—6	55	42	140	685	3000	18,04	0,064
МУВП1-55	55	190	226	2—6	55	42	140	685	3000	17,12	0,064
МУВП1-60	60	220	286	2—6	55	42	170	1080	2650	27,95	0,13
МУВП1-65	65	220	286	2—6	55	42	170	1080	2650	27,17	0,13
МУВП1-70	70	250	288	2—8	70	58	190	1960	2240	38,43	0,24
МУВП1-75	75	250	288	2—8	70	58	190	1960	2240	37,29	0,24
МУВП1-80	80	320	350	2—10	85	75	190	3920	1700	83,21	0,81
МУВП1-85	85	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	81,64	0,81
МУВП1-90	90	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	80,01	0,81
МУВП1-95	95	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	78,20	0,81
МУВП1-100	100	400	432	2—12	110	90	242	7850	1400	161,8	2,45
МУВП1-110	110	400	432	2—12	110	90	300	7850	1400	156,9	2,45
МУВП1-120	120	400	432	2—12	110	90	300	7850	1400	151,6	2,45
МУВП1-125	125	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	272,9	6,75
МУВП1-130	130	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	269,3	6,75
МУВП1-140	140	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	291	7,1
МУВП1-160	160	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	282,9	7,1

Примечание. Данные таблицы из нормали машиностроения МН 2096-64.

Приложение 14

Подшипники качения

а) Шарикоподшипники радиальные однорядные (ГОСТ 8338-75)

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Легкая серия							
200	10	30	9	1	4600	2610	20 000
201	12	32	10	1	4700	2850	20 000
202	15	35	11	1	5850	3470	16 000
203	17	40	12	1	7400	4400	16 000
204	20	47	14	1,5	9800	6200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6950	10 000
206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2,0	19 700	13 600	8000
208	40	80	18	2,0	26 100	17 800	6300
209	45	85	19	2,0	25 200	17 800	6300
210	50	90	20	2,0	27 000	19 800	6300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4000
215	75	180	25	2,5	51 000	41 000	4000
216	30	140	26	3,0	56 000	44 500	4000
217	85	150	28	3,0	64 000	53 100	4000
218	90	160	30	3,0	74 000	60 500	3150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3150
Средняя серия							
300	10	35	11	1,0	6250	3750	20 000
301	12	37	12	1,5	7500	4640	16 000
302	15	42	13	1,5	8750	5400	16 000

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
303	17	47	14	1,5	10 700	6870	12 500
304	20	52	15	2,0	12 250	7780	12 500
305	25	62	17	2,0	17 260	11 400	10 000
306	30	72	19	2,0	21 600	14 800	8000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6300
309	45	100	25	2,5	37 000	26 200	6300
310	50	110	27	3,0	47 500	35 500	5000
311	55	120	29	3,0	55 000	41 800	5000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4000
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3150
317	85	180	41	4,0	102 000	89 400	3150
318	90	190	43	4,0	110 000	99 000	3150
319	95	200	45	4,0	117 600	109 000	2500
320	100	215	47	4,0	134 000	130 000	2500
321	105	225	49	4,0	141 000	142 000	2500
322	110	240	60	4,0	158 000	167 000	2500
324	120	260	55	4,0	167 000	180 000	2000
326	130	280	58	5,0	176 500	194 000	1600

б) Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами (ГОСТ 8328-75)

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Средняя узкая серия							
32305	25	62	17	2,0	22 200	14 500	8000
32306	30	72	19	2,0	29 600	20 200	8000
32307	35	30	21	2,5	33 400	22 800	6300
32308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6300
32309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6300
32310	50	110	27	3,0	64 000	46 500	5000
32311	55	120	29	3,0	82 500	61 500	5000
32312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4000
32313	55	140	33	3,5	103 000	78 800	4000
32314	70	150	35	3,5	121 000	95 500	4000
32315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3150
32316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3150
32317	85	180	41	4,0	175 000	143 000	3150
32318	90	190	43	4,0	190 000	157 000	2500
32319	95	200	45	4,0	206 000	171 500	2500
32320	100	215	47	4,0	238 000	197 000	2500
32322	110	240	60	4,0	301 000	257 000	2000
32324	120	260	55	4,0	380 000	332 000	2000
32326	130	280	58	5,0	424 000	374 000	2000
32328	140	300	62	5,0	469 000	419 000	1600
32332	160	340	68	5,0	541 000	497 000	1600
32336	180	380	75	5,0	764 000	724 000	1250
32340	200	420	60	6,0	860 000	818 000	1250
Средняя широкая серия							
32605	25	62	24	2,0	36 700	27 800	8000
32606	80	72	27	2,0	40 900	30 600	8000
32607	35	80	31	2,5	45 800	34 200	6300

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
32608	40	90	83	2,5	59 900	46 600	6300
32609	45	100	38	2,5	77 700	61 500	6300
32610	50	110	40	3,0	102 000	85 500	5000
32611	55	120	43	3,0	113 000	92 500	5000
32612	60	130	46	3,5	137 000	116 000	4000
32613	65	140	48	3,5	149 000	126 500	4000
32615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3150
32616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3150
32617	85	180	60	4,0	254 000	230 000	3150
32618	90	190	64	4,0	265 000	240 000	2500
32620	190	215	73	4,0	356 000	336 000	2500
32622	110	240	80	4,0	464 000	450 000	2000
32624	120	260	86	4,0	548 000	532 000	2000
32626	130	280	93	5,0	650 000	650 000	2000
32630	150	320	108	5,0	753 000	757 000	1600
32634	170	360	120	5,0	1 040 000	1 080 000	1250

в) Подшипники шариковые радиальные однорядные с двумя уплотнениями (ГОСТ 8882-75)

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
180500	10	30	14	1,0	4590	2670	8000
180501	12	32	14	1,0	4690	2670	8000
180502	15	35	14	1,0	5220	3030	6300
180503	17	40	16	1,0	7360	4410	6300
180504	20	47	18	1,5	8220	5000	5000
180505	25	52	18	1,5	10 800	6950	4000
180506	30	62	20	1,5	11 600	7740	4000
180508	40	80	23	2,0	23 200	17 750	3150
180509	45	85	23	2,0	24 100	17 850	3150
180602	15	42	17	1,5	8750	5410	8000
180603	17	47	19	1,5	10 700	6680	8000

г) Шарикоподшипники радиально-упорные сдвоенные (ГОСТ 832-66)

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Легкая серия							
346205	25	52	30	1,5	19 700	16 700	12 500
346206	30	62	32	1,5	25 800	22 000	10 000
346209	45	85	38	2,0	48 400	46 200	6300
346222	110	200	76	3,5	216 500	270 000	3150
346234	170	310	104	5,0	380 000	600 000	2000
346244	220	400	130	5,0	412 000	696 000	1000
Средняя серия							
346308	40	90	46	2,5	59 000	55 100	6300
346310	50	110	54	3,0	89 500	88 000	5000
346312	60	130	62	3,5	118 500	118 600	4000
346313	65	140	66	3,5	140 500	150 000	4000
346320	100	215	94	4,0	266 000	352 000	2500
346322	110	240	100	4,0	297 000	414 000	2000
346330	150	320	130	5,0	445 000	740 000	1250

Примечание. d — внутренний диаметр, D — наружный диаметр; B — ширина; r — радиус закругления обоймы; C — динамическая грузоподъемность; C_0 — статическая грузоподъемность; n — предельная частота вращения подшипника.

Основная кривая намагничивания

Сталь 2013

В, Т	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/см									
0,4	0,56	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62
0,5	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69
0,6	0,70	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76	0,77
0,7	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
0,3	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
0,9	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
1,0	1,1	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
1,1	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,32	1,83	1,34	1,36	1,38
1,2	1,41	1,46	1,52	1,58	1,64	1,70	1,76	1,82	1,88	1,94
1,3	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90
1,4	3,00	3,20	3,50	3,80	4,10	4,30	4,60	5,00	5,40	5,80
1,5	6,20	6,70	7,80	8,90	10,0	11,3	12,4	13,5	14,6	15,8
1,6	17,0	18,6	20,2	21,8	23,4	25,0	27,0	28,0	30,0	32,0
1,7	34,0	37,0	40,0	43,0	47,0	50,0	54,0	38,0	62,0	55,0
1,8	70,0	76,0	80,0	85,0	92,0	100	106	112	118	124
1,9	130	136	142	148	156	165	173	181	189	198
2,0	207	226	244	263	281	300	360	420	480	540
2,1	600	670	740	810	880	950	1020	1090	1160	1230
2,2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2,3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2,4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

Приложение 16

Основная кривая намагничивания

Сталь 2211 и 2312

В, Т	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/см									
0,4	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,75	0,75
0,5	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
0,6	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
0,7	0,96	0,99	1,03	1,08	1,13	1,18	1,22	1,26	1,31	1,35
0,8	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85
0,9	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35
1,0	2,40	2,46	2,52	2,58	2,64	2,70	2,76	2,82	2,88	2,94
1,1	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90
1,2	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,80	4,70	4,80	5,00	6,20
1,3	5,50	5,80	6,10	6,50	6,90	7,30	7,80	8,30	8,80	9,40
1,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,4
1,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	27,0	29,0	31,0
1,6	34,0	36,0	88,0	41,0	44,0	47,0	53,0	59,0	65,0	71,0
1,7	77,0	32,0	89,0	94,0	100	106	111	117	122	128
1,8	134	140	146	152	168	164	170	176	182	188
1,9	194	200	218	237	257	278	300	322	344	366
2,0	388	410	432	464	476	498	520	545	575	605
2,1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760

Основная кривая намагничивания

Сталь 2411

B, T	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,67	0,88	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
0,5	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89
0,6	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07
0,7	1,09	1,11	1,13	1,16	1,17	1,19	1,22	1,24	1,27	1,30
0,8	1,33	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,54	1,58	1,62
0,9	1,66	1,70	1,74	1,79	1,84	1,87	1,94	1,99	2,05	2,11
1,0	2,17	2,23	2,30	2,37	2,44	2,52	2,60	2,69	2,77	2,86
1,1	2,95	3,04	3,14	3,24	3,34	3,44	3,55	3,66	3,77	3,88
1,2	3,99	4,11	4,23	4,35	4,47	4,60	4,73	4,86	5,0	5,4
1,3	5,85	6,30	6,80	7,35	7,95	8,60	9,30	10,0	10,7	11,5
1,4	12,3	13,2	14,2	15,2	16,3	17,5	18,7	20,1	21,6	23,2
1,5	25,0	26,8	28,7	30,8	33,0	36,4	33,0	40,9	43,8	47,0
1,6	50,0	53,8	57,6	62,0	66,5	71,2	76,5	82,0	88,0	94,0
1,7	100	105	110	115	120	125	131	137	143	149
1,8	156	162	168	175	183	191	200	209	219	229
1,9	239	250	262	274	287	300	320	360	420	500
2,0	590	680	770	860	950	1040	1130	1220	1310	1400
2,1	1490	1580	1670	1760	1850	1940	2030	2120	2210	2300
2,2	2390	2480	2570	2660	2750	2840	2930	3020	3110	3200
2,3	3290	3380	3470	3560	3650	3740	3830	3920	4010	4100
2,4	4190	4280	4370	4460	4550	4640	4730	4820	4910	5000

Приложение 18

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

Сталь 2013

B, T	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,24	1,27	1,3	1,33	1,36	1,38	1,41	1,44	1,47	1,5
0,5	1,54	1,57	1,6	1,64	1,67	1,71	1,74	1,77	1,8	1,84
0,6	1,88	1,91	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08	2,12	2,16	2,2
0,7	2,23	2,26	2,29	2,33	2,36	2,4	2,43	2,47	2,50	2,53
0,8	2,56	2,59	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,77	2,80	2,83
0,9	2,86	2,90	2,93	2,97	3,01	3,04	3,08	3,12	3,16	3,20
1,0	3,24	3,29	3,33	3,38	3,42	3,46	3,50	3,55	3,60	3,65
1,1	3,70	3,75	3,80	3,85	3,91	3,96	4,01	4,06	4,11	4,17
1,2	4,24	4,30	4,36	4,42	4,48	4,55	4,61	4,67	4,73	4,79
1,3	4,86	4,96	5,04	5,14	5,24	5,33	5,63	5,74	5,84	5,85
1,4	5,36	5,98	6,10	6,22	6,34	6,46	6,58	6,70	6,83	6,96
1,5	7,09	7,22	7,35	7,49	7,63	7,77	7,91	8,05	8,20	8,35
1,6	8,5	8,78	9,06	9,34	9,62	9,90	10,2	10,5	10,8	11,1
1,7	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9	13,3	13,6	14,0	14,4	14,8
1,8	15,2	15,7	16,2	16,7	17,2	17,7	18,3	18,9	19,5	20,1
1,9	20,7	21,6	22,5	23,4	24,3	25,2	26,1	27,6	28,9	30,2
2,0	31,5	33,2	35,0	36,8	38,6	40,4	42,6	44,8	47,0	49,2
2,1	51,4	54,4	57,4	50,5	63,6	66,7	71,2	75,7	80,2	84,7
2,2	89,2	94,3	99,4	104,6	109,8	115	120	126	132	138
2,3	144	151	158	165	172	180	188	196	205	214

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

Сталь 2211 и 2312

B, Т	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,71
0,5	1,74	1,77	1,80	1,84	1,86	1,90	1,92	1,96	1,98	2,02
0,6	2,04	2,09	2,13	2,16	2,21	2,24	2,29	2,33	2,37	2,41
0,7	2,45	2,49	2,53	2,57	2,62	2,67	2,72	2,77	2,82	2,87
0,8	2,92	2,97	3,02	3,06	3,11	3,16	3,22	3,26	3,31	3,37
0,9	3,42	3,47	3,53	3,60	3,66	3,72	3,79	3,84	3,90	3,96
1,0	4,03	4,09	4,17	4,25	4,33	4,40	4,50	4,60	4,70	4,77
1,1	4,88	4,97	5,09	5,17	5,27	5,37	5,47	5,59	5,70	5,82
1,2	5,93	6,02	6,13	6,26	6,38	6,51	6,63	6,77	6,95	7,10
1,3	7,24	7,38	7,55	7,70	7,90	8,04	8,20	8,40	8,57	8,79
1,4	8,97	9,17	9,36	9,55	9,77	10,0	10,2	10,4	10,6	10,9
1,5	11,2	11,5	11,7	12,1	12,4	12,7	13,1	13,3	13,7	14,1
1,6	14,5	14,9	15,3	15,6	16,1	16,5	16,9	17,5	17,9	18,4
1,7	19,0	19,4	20,0	20,7	21,4	22,2	23,0	23,8	25,0	26,0
1,8	27,0	28,0	29,2	30,5	32,2	33,3	34,9	36,1	37,1	40,0
1,9	41,6	43,5	46,0	48,0	50,3	53,3	54,3	57,9	61,3	64,2
2,0	67,5	71,7	74,0	77,9	81,5	85,2	90,0	94,0	97,5	102
2,1	106	110	116	[illegible]	126	130	135	141	147	154
2,2	159	165	173	178	185	191	196	203	211	220
2,3	231	243	255	268	281	295	309	324	339	364

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

Сталь 2411

B, Т	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,72	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82
0,5	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92
0,6	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,04
0,7	1,05	1,06	1,08	1,10	1,11	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20
0,8	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40
0,9	1,42	1,44	1,47	1,49	1,51	1,55	1,66	1,60	1,63	1,65
1,0	1,68	1,71	1,75	1,77	1,80	1,84	1,88	1,91	1,96	2,00
1,1	2,04	2,07	2,12	2,16	2,22	2,27	2,32	2,37	2,42	2,47
1,2	2,54	2,59	2,55	2,72	2,77	2,84	2,91	2,98	3,07	3,16
1,3	3,23	3,33	3,41	3,51	3,61	3,72	3,88	3,94	4,04	4,21
1,4	4,26	4,32	4,61	4,80	4,97	5,18	5,37	5,54	5,73	5,96
1,5	6,22	6,44	6,73	7,00	7,28	7,56	7,95	8,28	8,59	8,90
1,6	9,32	9,76	10,2	10,7	11,3	11,8	12,6	13,5	14,4	15,2
1,7	16,3	17,4	18,7	20,2	21,3	23,0	24,5	26,3	28,3	30,4
1,8	31,9	34,1	35,9	38,3	41,0	44,0	46,0	48,0	51,0	54,0
1,9	57,0	59,0	63,0	66,0	69,0	72,0	77,0	81,0	83,0	87,0
2,0	92,0	97,0	100	105	109	114	120	127	131	[illegible]
2,1	142	150	158	165	172	179	187	198	206	216
2,2	226	237	246	261	269	287	300	314	332	354
2,3	376	399	422	446	470	495	520	546	572	598

Приложение 21

Кривая намагничивания для спинки асинхронных двигателей

Сталь 2013

B, Т	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62
0,5	0,64	0,65	0,66	0,67	0,69	0,71	0,72	0,74	0,76	0,78
0,6	0,80	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97
0,7	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,11	1,13	1,16	1,18	1,21
0,8	1,24	1,26	1,29	1,32	1,35	1,38	1,40	1,43	1,46	1,49
0,9	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,68	1,71	1,74	1,77	1,81
1,0	1,85	1,88	1,91	1,95	1,99	2,03	2,06	2,09	2,13	2,17
1,1	2,21	2,26	2,29	2,33	2,37	2,41	2,45	2,49	2,53	2,57
1,2	2,62	2,67	2,72	2,77	2,83	2,89	2,96	3,01	3,07	3,13
1,3	3,20	3,27	3,34	3,41	3,49	3,57	3,65	3,73	3,82	3,91
1,4	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,50	4,64	4,78	4,92	5,06
1,5	5,20	5,42	5,64	5,86	6,08	6,30	6,54	6,78	7,02	7,26
1,6	7,50	7,88	8,26	8,64	9,02	9,40	9,82	10,2	10,7	11,1
1,7	11,5	12,2	12,9	13,6	14,3	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,8	20,0	21,6	23,2	24,9	26,5	28,1	29,6	31,1	32,7	34,2
1,9	35,7	38,0	40,3	42,6	44,9	47,2	49,3	51,4	53,5	55,6
2,0	57,7	60,0	63,0	66,0	70,0	74,0	79,0	84,0	90,0	97,0

Приложение 22

Кривая намагничивания для спинки асинхронных двигателей

Сталь 2211 и 2312

B, Т	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06
0,5	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28
0,6	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,56
0,7	1,59	1,62	1,66	1,69	1,72	1,76	1,80	1,83	1,86	1,90
0,8	1,94	1,98	2,01	2,04	2,08	2,12	2,16	2,20	2,23	2,27
0,9	2,31	2,35	2,39	2,43	2,48	[illegible],52	2,55	2,60	2,65	2,69
1,0	2,74	2,79	2,84	2,89	2,95	[illegible],00	3,05	3,11	3,18	3,23
1,1	3,32	3,38	3,44	3,51	3,57	3,6[illegible]	3,74	3,82	3,90	3,98
1,2	4,10	4,18	4,26	4,35	4,44	4,55	4,66	4,75	4,87	4,98
1,3	5,09	5,21	5,33	5,46	5,58	5,72	5,86	6,00	6,18	6,35
1,4	6,56	6,75	6,95	7,15	7,40	7,63	7,89	8,15	8,43	8,70
1,5	9,05	9,34	9,65	10,0	10,4	10,9	11,3	11,9	12,4	12,9
1,6	13,7	14,4	15,2	15,9	16,6	17,2	18,2	19,1	20,1	21,1
1,7	21,8	23,1	24,1	25,5	26,1	27,2	28,4	29,8	31,3	32,9
1,8	34,6	36,3	38,0	39,7	41,1	43,1	44,9	46,7	48,5	50,1
1,9	52,2	56,0	60,0	64,0	69,0	74,0	79,0	85,0	91,0	97,0
2,0	104	111	118	125	133	141	149	158	167	176

Кривая намагничивания для спинки асинхронных двигателей

Сталь 2411

B, Т	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,58	0,53	0,54
0,5	0,55	0,56	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,61	0,62
0,6	0,63	0,64	0,55	0,66	0,67	0,68	0,69	0,69	0,70	0,71
0,7	0,72	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79
0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,92	0,94
0,9	0,95	0,98	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,14
1,0	1,16	1,18	1,21	1,24	1,26	1,29	1,32	1,36	1,39	1,43
1,1	1,46	1,50	1,54	1,58	1,62	1,67	1,72	1,76	1,32	1,88
1,2	1,92	1,98	2,04	2,10	2,16	2,22	2,30	2,38	2,46	2,60
1,3	2,72	2,88	3,00	3,16	3,30	3,40	3,58	3,70	3,86	3,99
1,4	4,10	4,40	4,60	4,90	5,30	5,70	6,10	6,60	7,10	7,70
1,5	8,20	8,90	9,60	10,3	11,0	11,7	12,3	13,1	14,0	14,8
1,6	15,6	16,4	17,3	18,2	19,2	20,0	21,0	22,6	24,4	26,0
1,7	28,0	29,6	31,0	32,6	34,0	35,8	37,4	39,0	41,0	43,0
1,8	45,0	47,0	60,0	53,0	55,0	58,0	61,0	64,0	68,0	72,0
1,9	76,0	80,0	86,0	91,0	97,0	103	111	119	131	142
2,0	160	180	200	220	238	255	276	296	315	338

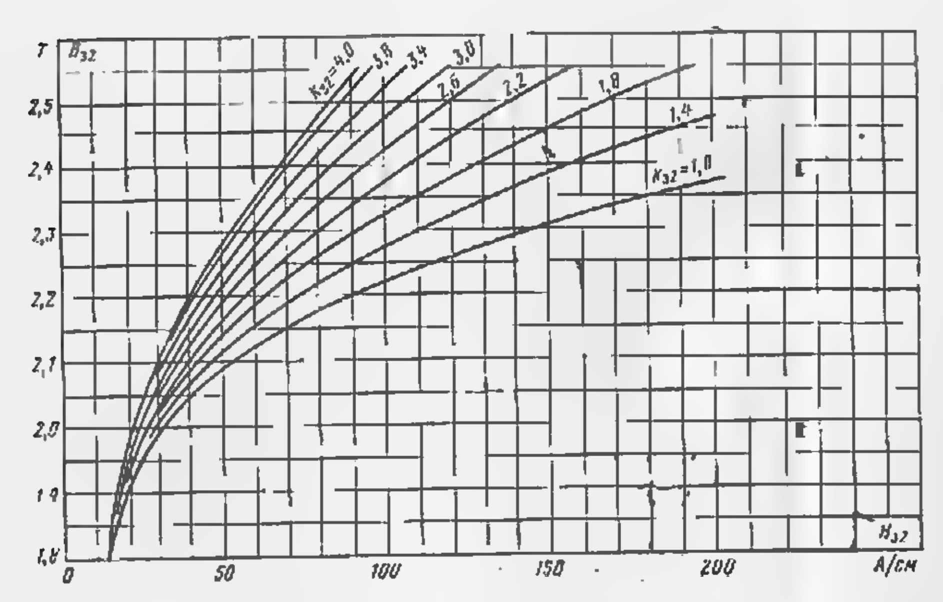


Рис. 11-24. Кривые намагничивания для зубцов асинхронных двигателей. Сталь 2013.

Приложение 25

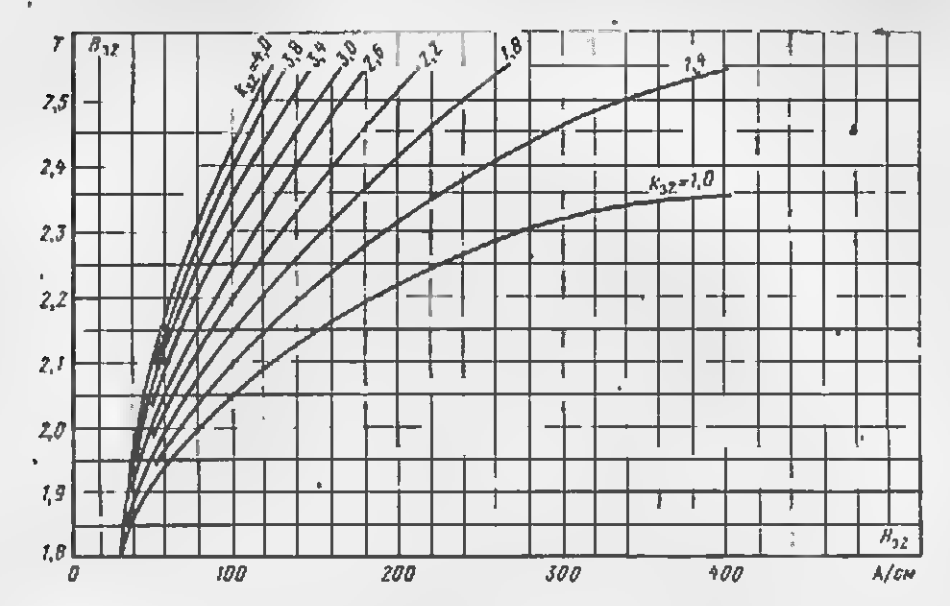


Рис. П 25. Кривые намагничивания для зубцов асинхронных двигателей. Сталь 2211, 2312 и 2411.


Приложение 26

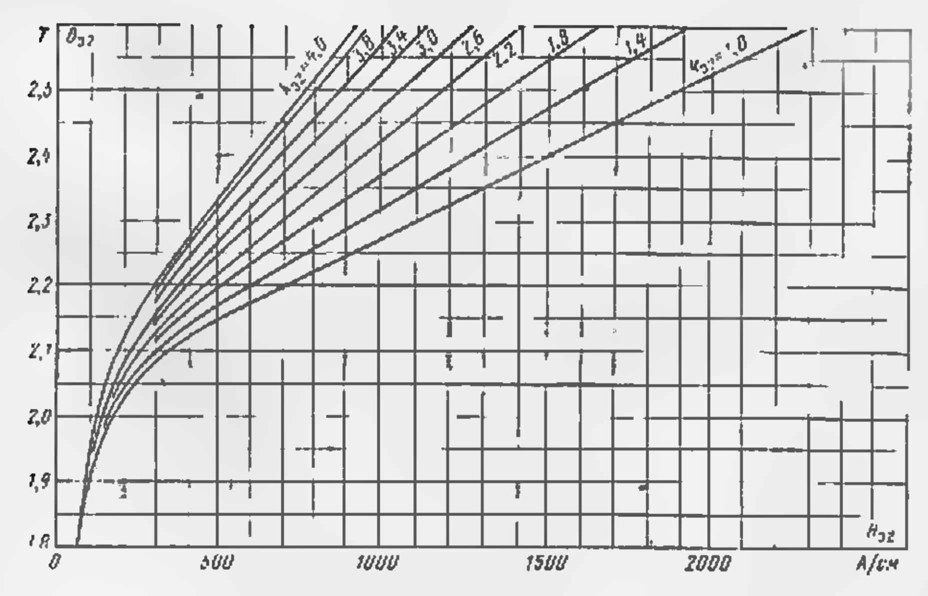


Рис. П-26. Кривые намагничивания для зубцов двигателей постоянного тока. Сталь 2013.

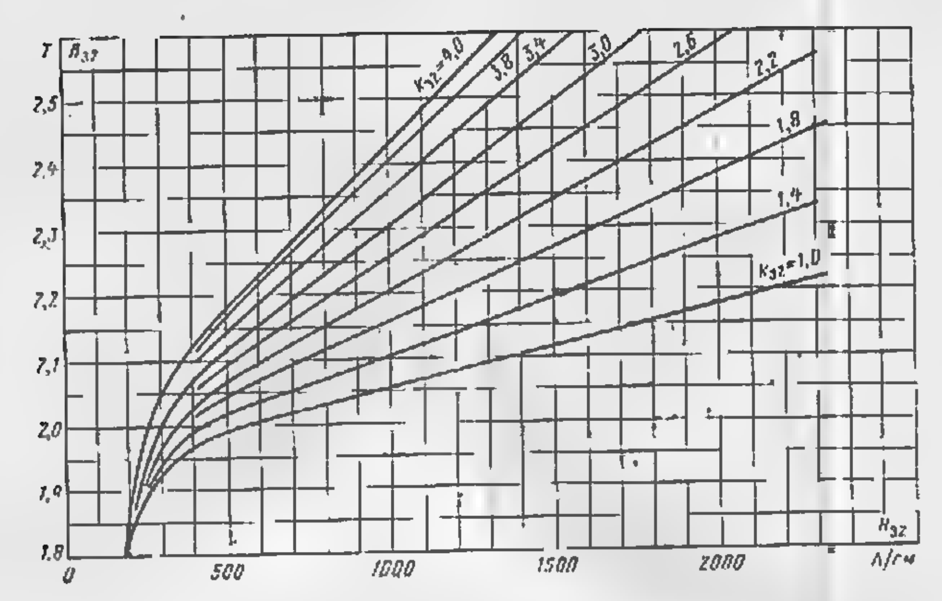


Рис П-27 Кривые намагничивания для зубцов двигателей постоянного тока. Сталь 2211, 2312 и 2411.

Приложение 28

Кривая намагничивания для полюсов двигателей постоянного тока

Сталь 3411

B, Т	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
1,0	1,7	1,7	1,8	1,85	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1
1,1	2,2	2,2	2,3	2,35	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7
1,2	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
1,3	3,7	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3	4,5	4,6	4,7	4,8
1,4	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8
1,5	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7
1,6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1,7	20	21	22	23	24	25	28	31	34	37
1,8	40	43	46	50	54	59	65	71	78	85
1,9	92	100	112	130	155	190	225	260	300	350
2,0	400	450	500	550	600	—	—	—	—	—

Кривая намагничивания для массивных стальных станин двигателей постоянного тока

B, T	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/см									
0,0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72
0,1	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52
0,2	1,60	1,68	1,76	1,84	1,92	2,00	2,08	2,16	2,24	2,32
0,3	2,40	2,48	2,56	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12
0,4	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92
0,5	4,00	4,08	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,9	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,50	8,73	8,85	8,93	9,11
1,0	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,0	10,2	10,4	10,6	10,7
1,1	10,9	11,1	11,3	11,5	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,7
1,2	12,9	18,1	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	16,2	15,5
1,3	16,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
1,4	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	26,0
1,5	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,6	37,0	38,3	39,6
1,6	41,0	42,5	44,0	45,6	47,0	48,5	50,0	51,5	53,0	55,0
1,7	85,0	88,0	91,0	94,0	97,0	100	106	110	116	122

Приложение 30

Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²
0,06	0,08	0,00283	0,15*	0,18	0,01767
0,07	0,09	0,00385	0,16	0,19	0,0201
0,08	0,10	0,00503	0,17*	0,20	0,0227
0,09	0,11	0,00636	0,18	0,21	0,0255
0,10	0,122	0,00785	0,19*	0,22	0,0284
0,11*	0,132	0,00950	0,20	0,23	0,0314
0,112	0,134	0,00985	0,21*	0,24	0,0346
0,12	0,142	0,01131	0,224	0,259	0,0394
0,13*	0,152	0,01327	0,23*	0,265	0,0415
0,14	0,162	0,01539	0,25	0,285	0,0491

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²
0,27*	0,305	0,0573	0,96*	1,025	0,724
0,28	0,315	0,0616	1,00	1,08	0,785
0,29*	0,325	0,0661	1,04*	1,12	0,849
0,31	0,345	0,0755	1,06	1,14	0,883
0,33*	0,365	0,0855	1,08*	1,16	0,916
0,35	0,39	0,0962	1,12	1,20	0,985
0,38*	0,42	0,1134	1,16*	1,24	1,057
0,40	0,44	0,1257	1,18	1,26	1,094
0,41*	0,46	0,1320	1,20*	1,28	1,131
0,44*	0,48	0,1521	1,25	1,33	1,227
0,45	0,49	0,1590	1,30*	1,385	1,327
0,47*	0,51	0,1735	1,32	1,405	1,368
0,49*	0,53	0,1886	1,35*	1,435	1,431
0,50	0,545	0,1963	1,40	1,485	1,539
0,51*	0,565	0,204	1,45*	1,535	1,651
0,53*	0,585	0,221	1,50	1,585	1,767
0,55*	0,605	0,238	1,56*	1,645	1,911
0,56	0,616	0,246	1,60	1,685	2,011
0,57*	0,625	0,255	1,62*	1,705	2,06
0,59*	0,645	0,273	1,68*	1,765	2,22
0,62*	0,675	0,302	1,70	1,785	2,27
0,63	0,69	0,312	1,74*	1,825	2,38
0,64*	0,70	0,322	1,80	1,895	2,51
0,67*	0,73	0,353	1,81*	1,905	2,57
0,69*	0,75	0,374	1,88*	1,975	2,78
0,71	0,77	0,396	1,90	1,995	2,83
0,72	0,78	0,407	1,95*	2,045	2,99
0,74*	0,805	0,430	2,00	2,095	3,14
0,75	0,815	0,442	2,02*	2,115	3,20
0,77*	0,835	0,466	2,10*	2,20	3,46
0,80	0,865	0,503	2,12	2,22	3,53
0,83*	0,895	0,541	2,24	2,34	3,94
0,35	0,915	0,567	2,26*	2,36	4,01
0,86*	0,925	0,581	2,36	2,46	4,36
0,90	0,865	0,636	2,44*	2,54	4,68
0,93*	0,995	0,679	2,50	2,60	4,91
0,95	1,015	0,700			

Примечания: 1. Провода, размеры которых отмечены звездочками, допускаются до 1 января 1979 г. Указанные провода в новых разработках не должны применяться.

2. Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учетом расчетной средней двухсторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщин.

Размеры и площадь поперечного сечения проволоки прямоугольной, лент и шин медных

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм																	
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм²																	
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,735	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,635	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,906	—	[illegible]	—	2,415	—	2,703	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,150	2,294	2,429	2,555	2,742	2,921	3,145	[illegible]	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,960	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,581	—	—	—	—	—
2,50	1,863	1,970	2,070	2,181	2,285	2,435	2,585	2,730	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	[illegible]	4,187	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	[illegible]	[illegible]	—
3,00	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,536	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,342	6,737	7,163
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,367	—	7,137	—
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,267	—	8,137	—
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,137	8,637	9,177
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,168	—	9,137	—
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,065	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,30	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,94	11,61
6,00	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,265	—	8,185	—	9,345	—	10,44	—	11,54	—
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,90
6,70	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,160	—	9,165	—	10,510	—	11,70	—	13,34	—
7,10	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,94	14,60
7,50	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,20	—	11,79	—	13,14	—	14,54	—
8,00	—	—	—	—	7,785	8,205	8,745	9,225	9,785	10,35	10,90	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,84	16,60
8,50	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,60	—	13,39	—	14,94	—	16,04	—
9,00	—	—	—	—	—	—	9,865	10,40	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,50	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—
10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,54	18,64	19,04	20,94
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,59	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	13,50	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,67	—	20,68	—	23,24	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	25,14

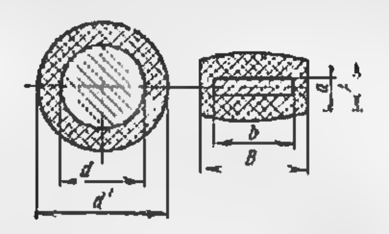
Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм																
	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Расчетное сечение проволоки, мм²																
2,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	[illegible]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,141	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,569	[illegible]	[illegible]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,037	—	8,620	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,00	8,597	8,891	9,451	[illegible]	10,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	9,167	—	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	9,717	10,07	10,71	11,39	12,05	[illegible]	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	10,28	—	11,33		12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,00	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,2[illegible]	17,20	—	—	—	—	—	—	—	—
5,30	11,61	—	12,70	—	14,29	—	15,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,60	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,13	20,14	21,64	—	—	—	—	—	—
6,00	13,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,76	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,30	13,73	14,32	15,90	16,15	17,00	18,36	19,30	20,53	21,82	22,77	24,34	25,02	27,49	—	—	—	—
6,70	14,65	—	16,20	—	18,21	—	20,56	—	23,34	—	25,54	—	29,29	—	—	—	—
7,10	15,54	15,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,63	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,50	16,44	—	18,20	—	20,45	—	23,08	—	25,03	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8,00	17,50	18,33	19,45	20,55	21,85	23,45	24,85	26,25	27,65	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,64	43,94
8,50	18,68	—	20,70	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,30	—	41,64	—	46,74
9,00	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65	26,47	27,90	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,54	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	20,92	—	25,20	—	26,3[illegible]	—	29,39	—	33,18	—	37,14	—	41,49	—	46,64	—	52,34
10,0	23,04	23,07	25,45	25,07	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	35,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,8	23,38	—	25,36	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,84	—	46,34	—	52,14	—	58,50
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	45,74	49,54	52,34	55,14	58,30	61,86
11,8	[illegible]	—	28,35	—	32,40	—	36,62	—	41,34	—	46,34	—	52,24	—	58,14	—	65,22
12,6	27,54	24,95	30,70	32,56	34,45	36,97	38,83	41,33	43,83	46,52	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм												
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,80	4,00	4,10	4,25	4,40	4,50	4,70	4,75
	Расчетное сечение проволоки, мм²												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,2	—	36,97	—	39,21	41,14	—	43,94	—	46,74	—	49,54	—	52,34
11,6	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	41,34	—	—	48,34	—	—	—	52,24	—	—
12,5	—	41,33	—	43,83	46,32	—	49,14	—	52,27	—	55,39	—	58,52
13,2	—	—	—	46,31	—	—	51,94	—	—	—	58,54	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,0	—	46,35	—	49,15	51,95	—	55,14	—	58,64	—	62,14	—	65,64
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,0	—	—	—	52,70	—	—	59,14	—	—	—	66,34	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0	—	53,06	—	56,25	59,14	—	63,14	—	67,14	—	71,14	—	75,14
16,8	54,02	—	58,82	—	—	63,36	—	68,02	—	73,06	—	78,10	—
18,0	58,50	—	63,06	—	—	67,92	—	72,94	—	78,34	—	83,74	—
19,5	63,48	—	68,35	—	—	73,62	—	79,09	—	84,94	—	90,79	—
20,0	—	—	—	—	—	—	79,52	—	—	—	—	—	—
22,0	71,08	—	77,18	—	—	83,12	—	89,34	—	95,94	—	102,54	—
25,0	81,52	—	87,77	—	—	94,52	99,52	101,64	—	109,14	—	116,40	—
26,3	—	—	92,36	—	—	99,46	—	106,97	—	114,86	—	122,75	—
28,0	—	—	—	—	—	105,92	111,94	113,94	—	122,34	—	130,74	—
30,0	—	—	—	—	—	113,52	119,52	122,14	—	131,14	—	140,14	—
32,0	—	—	—	—	—	—	—	130,34	—	139,94	—	149,54	—
35,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	153,14	—	163,54	—

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм												
	5,00	5,10	5,30	5,50	5,60	6,00	6,50	7,00	8,00	9,00	10,0	11,0	12,5
	Расчетное сечение проволоки, мм²												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	95,34	—	—	—
11,2	57,14	—	58,50	—	61,86	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	103,34	—	—	—
11,8	58,14	—	—	—	65,22	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	61,64	—	65,30	—	69,14	—	—	—	99,14	111,64	124,14	136,64	155,41
13,2	65,14	—	—	—	73,06	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	93,64	107,14	120,34	—	—	—
14,0	69,14	—	73,34	—	77,54	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	93,39	100,64	115,14	129,54	—	—	—
15,0	74,14	—	—	—	83,14	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	100,54	108,34	123,04	139,64	154,14	—	—
16,0	79,14	—	83,94	—	88,74	95,14	—	—	127,14	—	—	—	—
16,6	—	84,82	—	91,54	—	99,94	108,54	116,74	133,54	—	—	—	—
18,0	—	90,94	—	98,14	—	107,14	116,14	125,14	143,14	—	—	—	—
19,5	—	98,59	—	106,39	—	116,14	125,89	135,64	155,14	—	—	—	—
20,0	99,14	—	—	—	—	119,14	—	—	159,14	—	—	—	—
22,0	—	111,34	—	120,14	—	131,14	142,14	153,14	—	—	—	—	—
25,0	124,14	126,64	—	136,64	—	149,14	161,64	174,14	—	—	—	—	—
26,3	—	133,27	—	143,70	—	156,94	170,01	183,24	—	—	—	—	—
28,0	—	141,94	—	153,14	—	167,14	181,14	195,14	—	—	—	—	—
30,0	149,14	152,14	—	164,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32,0	—	162,34	—	175,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных сверху и снизу жирной линией (—), может изготовляться в виде обмоточного провода марки ПЭТВП и ПЭТП-155 с нагревостойкой высокопрочной эмалевой изоляцией, в пределах, ограниченных светлой линией (—) — марок ПСД и ПСДК с изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким или кремнийорганическим лаком, в пределах, ограниченных полужирной линией (—) — марки ПСДКТ с утоненной изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком.

Толщина изоляции обмоточных проводов марок ПСД, ПСДК и ПСДКТ



а) Номинальная толщина изоляции ($d'-d$), мм, проводов круглого поперечного сечения

Номинальный диаметр провода	Марка провода		Номинальный диаметр провода	Марка провода	
	ПСДКТ	ПСД и ПСДК		ПСДКТ	ПСД и ПСДК
От 0,31 до 0,49	0,14	0,23	От 1,62 до 1,74	0,22	0,27
От 0,51 до 0,69	0,16	0,25	От 1,81 до 2,10	0,22	0,27
От 0,72 до 0,96	0,16	0,25	От 2,26 до 5,2	—	0,33
От 1,00 до 1,56	0,18	0,27			

б) Номинальная толщина изоляции, мм, проводов прямоугольного поперечного сечения

Марка провода	Номинальные размеры провода по меньшей стороне a			Номинальные размеры провода по большей стороне b						
	от 0,90 до 2,00	от 2,10 до 3,80	от 4,0 до 5,6	от 2,10 до 2,50	от 2,63 до 3,35	от 3,53 до 4,50	от 4,70 до 5,60	от 5,90 до 7,10	от 7,40 до 8,00	от 8,50 до 12,50
	$B-b$			$A-a$						
ПСДКТ	0,22	0,22	—	0,26	0,28	0,28	0,30	0,30	0,32	0,32
ПСД и ПСДК	0,27	0,33	0,4	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48

Приложение 33

Наиболее употребительные размеры и площади прямоугольного поперечного сечения прессованных шин из алюминия марки АДО (ГОСТ 15176-70)

Номинальный размер шины по меньшей стороне a, мм	Номинальный размер шины по большей стороне b, мм	Площадь поперечного сечения, мм²	Номинальный размер шины по меньшей стороне a, мм	Номинальный размер шины по большей стороне b, мм	Площадь поперечного сечения, мм²
4	30	120	5	50	250
4	40	160	5	60	300
4	50	200			
4	60	240	6	30	180
			6	40	240
5	30	150	6	50	300
5	40	200	6	60	360

ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

A_1 — линейная нагрузка обмотки статора и компенсационной обмотки, А/см

A_2 — линейная нагрузка обмотки ротора и якоря, А/см

a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря

a_1 — число параллельных ветвей обмотки статора и компенсационной обмотки

$a_д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов

a_c — число параллельных ветвей последовательной обмотки главных полюсов

$B_д$ — магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса, Т

B_{z1} — магнитная индукция в зубцах статора и наконечника главного полюса, Т

B_{z2} — магнитная индукция в зубцах ротора и якоря, Т

$B_п$ — магнитная индукция в сердечнике главного полюса, Т

B_{c1} — магнитная индукция в спинке статора и в станине, Т

B_{c2} — магнитная индукция в спинке ротора и якоря, Т

$B_δ$ — магнитная индукция в воздушном зазоре (максимальное значение), Т

$B_{δср}$ — магнитная индукция в воздушном зазоре (среднее значение), Т

$B_{δд}$ — магнитная индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом, Т

b — размер прямоугольного провода без изоляции по ширине паза или катушки возбуждения, мм

b' — размер прямоугольного провода с изоляцией по ширине паза или катушки возбуждения, мм

$b_д$ — ширина сердечника добавочного полюса, мм

$b_{к1}$ — размер дуги компенсационной обмотки по ширине, мм

$b_з$ — зазор между изолированным сердечником полюса и катушкой, мм

$b_{з.к}$ — ширина зоны коммутации, мм

b_{z1} — ширина зубца в статоре и в наконечнике главного полюса, мм

b_{z2} — ширина зубца в роторе и в якоре, мм

$b_и$ — толщина изоляции по ширине, мм

$b_к$ — ширина катушки возбуждения, мм

$b_{л1}$ — ширина катушки в лобовой части обмотки статора и компенсационной обмотки, мм

$b_{л2}$ — ширина катушки в лобовой части обмотки фазного ротора и якоря, мм

$b_{н.д}$ — ширина наконечника добавочного полюса, мм

$b_{п.п}$ — ширина полюсной дуги, мм

$b'_{п.п}$ — расчетная ширина полюсной дуги, мм

$b_п$ — ширина сердечника главного полюса, мм

$b_{п1}$ — ширина прямоугольного паза в штампе статора и наконечника главного полюса, мм

$b_{п2}$ — ширина прямоугольного паза в штампе ротора и якоря, мм

$b_{р.с}$ — ширина рулонной стали, мм

b_c — припуск по ширине паза на сборку сердечника, мм

$b_{ск}$ — припуск по ширине паза при наличии скоса пазов, мм

$b_{ср}$ — средняя ширина секции обмотки статора, ротора и якоря, мм

$b_{ст}$ — ширина стержня обмотки ротора и компенсационной обмотки, мм

$b_ш$ — ширина шлица паза, мм

$b_щ$ — ширина щетки, мм

$b'_щ$ — расчетная ширина щетки, мм

C — стоимость материала, руб

$C_{дв}$ — стоимость двигателя, руб.

$C_{пр}$ — стоимость производства, руб.

c — число элементарных проводников в эффективном проводнике

$D_{вен1}$ — внутренний диаметр лопаток центробежного вентилятора, мм

$D_{вен2}$ — наружный диаметр лопаток центробежного вентилятора, мм

$D_к$ — наружный диаметр коллектора, мм

$D_{кл.ср}$ — средний диаметр короткозамыкающего кольца ротора, мм

$D_{н1}$ — наружный диаметр сердечника статора и станины, мм

$D_{н2}$ — наружный диаметр сердечника ротора и якоря, мм

D_1 — внутренний диаметр сердечника статора и станины, мм

D_2 — внутренний диаметр сердечника ротора и якоря, мм

d — диаметр голого провода, мм

d' — диаметр провода с изоляцией, мм

$d_{к2}$ — диаметр аксиального вентиляционного канала ротора и якоря, мм

E_0 — э. д. с. холостого хода, В

E_1 — э. д. с. обмотки фазы статора, В

E_2 — э. д. с. обмотки фазы ротора и обмотки якоря, В

$e_к$ — коммутирующая э. д. с. в секции якоря, В

$e_р$ — реактивная э. д. с. коммутируемой секции якоря, В

$F_д$ — м. д. с. обмотки добавочных полюсов, А

$F_{з1}$ — магнитное напряжение зубцов статора и зубцов наконечника главного полюса, А

$F_{з2}$ — магнитное напряжение зубцов ротора и якоря, А

$F_п$ — магнитное напряжение сердечника главного полюса, А

$F_{п1}$ — магнитное напряжение воздушного зазора между главным полюсом и станиной, А

$F_{ра}$ — размагничивающее действие реакции якоря, А

$F_с$ — м. д. с. стабилизирующей последовательной обмотки главных полюсов, А

$F_{с1}$ — магнитное напряжение спинки статора и станины, А

$F_{с2}$ — магнитное напряжение спинки ротора и спинки якоря, А

$F_ш$ — м. д. с. параллельной и независимой обмотки возбуждения, А

F_1 — м. д. с. обмотки статора и компенсационной обмотки, А

F_2 — м. д. с. обмотки ротора и якоря, А

$F_δ$ — магнитное напряжение воздушного зазора, А

$F_{δд}$ — магнитное напряжение воздушного зазора между якорем и добавочным полюсом, А

f — частота сети переменного тока; частота перемагничивания, Гц

f_1 — частота тока статора, Гц

f_2 — частота тока ротора, Гц

$G_{а.кз}$ — масса алюминия короткозамкнутого ротора, кг

$G_д$ — масса стали сердечников добавочных полюсов, кг

$G_{дв}$ — масса двигателя, кг

$G_{з1}$ — масса стали зубцов статора и зубцов наконечника главного полюса, кг

$G_{з2}$ — масса стали зубцов ротора и зубцов якоря, кг

$G_и$ — масса изоляции, кг

$G_к$ — масса конструкционных материалов, кг

$G_{м.д}$ — масса проводов обмотки добавочных полюсов, кг

$G_{м.к}$ — масса коллекторной меди, кг

$G_{м.ш}$ — масса проводов параллельной и независимой обмотки возбуждения, кг

$G_{м1}$ — масса проводов обмотки статора и компенсационной обмотки, кг

$G_{м2}$ масса проводов обмотки ротора и якоря, кг

$G_п$ — масса стали сердечников главных полюсов, кг

$G_{с1}$ — масса стали спинки статора и станины, кг

$G_{с2}$ — масса стали спинки ротора и спинки якоря, кг

H — напор вентилятора или вентиляционных устройств, Па

$H_{з1}$ — напряженность магнитного поля в зубцах статора и наконечника главного полюса, А/см

$H_{з2}$ — напряженность магнитного поля в зубцах ротора и якоря, А/см

$H_п$ — напряженность магнитного поля в главном полюсе, А/см

$H_{с1}$ — напряженность магнитного поля в спинке статора и в станине, А/см

$H_{с2}$ — напряженность магнитного поля в спинке ротора и спинке якоря, А/см

h — размер прямоугольного провода без изоляции по высоте; высота оси вращения, мм

h' — размер прямоугольного провода с изоляцией по высоте, мм

$h_б$ — высота бандажной канавки якоря, мм

$h_д$ — высота добавочного полюса, мм

$h_{д1}$ — размер дуги компенсационной обмотки по высоте, мм

$h_и$ — толщина изоляции по высоте, мм

$h_к$ — высота клина, мм

$h_{кл}$ — высота короткозамыкающего кольца ротора, мм

$h_л$ — высота лопатки вентилятора, мм

$h_{л1}$ — высота катушки в лобовой части статора и компенсационной обмотки, мм

$h_{л2}$ — высота катушки в лобовой части обмотки фазного ротора и якоря, мм

$h_п$ — высота сердечника главного полюса, мм

$h_{п1}$ — высота прямоугольного паза в штампе статора и наконечника главного полюса, мм

$h_{п2}$ — высота прямоугольного паза в штампе ротора и якоря, мм

$h_р$ — высота продольного ребра на внешней поверхности статора, мм

$h_с$ — припуск по высоте паза на сборку сердечника, мм

$h_{ст}$ — высота стержня обмотки ротора и компенсационной обмотки, мм
$h_{с1}$ — высота спинки статора и станины, мм
$h_{с2}$ — высота спинки ротора и спинки якоря, мм
$h_{ш}$ — высота шлица паза, мм
I — ток двигателя постоянного тока, А
$I_{кл}$ — ток в короткозамыкающем кольце ротора, А
$I_{м}$ — намагничивающий ток, А
$I_{п}$ — начальный пусковой ток, А
$I_{ст}$ — ток стержня короткозамкнутого ротора, А
$I_{ш}$ — ток параллельной и независимой обмотки возбуждения, А
I_0 — ток холостого хода, А
I_1 — ток обмотки фазы статора, А
I_2 — ток обмотки фазы фазного ротора и ток якоря, А
$J_{д}$ — плотность тока в обмотке добавочных полюсов, А/мм²
$J_{д1}$ — плотность тока в дуге компенсационной обмотки, А/мм²
$J_{кл}$ — плотность тока в короткозамыкающем кольце ротора, А/мм²
$J_{с}$ — плотность тока в стабилизирующей последовательной обмотке главных полюсов, А/мм²
$J_{ст}$ — плотность тока в стержне обмотки ротора и компенсационной обмотки, А/мм²
$J_{ш}$ — плотность тока в параллельной и независимой обмотке возбуждения, А/мм²
$J_{щ}$ — плотность тока под щетками на контактных кольцах и на коллекторе, А/мм²
J_1 — плотность тока в обмотке статора и в секционной компенсационной обмотке, А/мм²
J_2 — плотность тока в обмотке ротора и обмотке якоря, А/мм²
K — число коллекторных пластин
$k_{в.т}$ — коэффициент вытеснения тока
$k_{зап}$ — коэффициент запаса м. д. с. параллельной и независимой обмотки возбуждения
$k_{з}$ — коэффициент, учитывающий частичное прохождение магнитного потока через паз
$k_{з.к}$ — отношение ширины зоны коммутации к нейтральной зоне
$k_{к}$ — коэффициент компенсации м. д. с. якоря компенсационной обмоткой
$k_{м}$ — коэффициент заполнения паза медью
$k_{н}$ — коэффициент насыщения магнитной цепи
$k_{н.м}$ — коэффициент нарастания мощности
$k_{об}$ — обмоточный коэффициент
$k_{п}$ — коэффициент заполнения паза изолированными проводами
$k_{пр1}$ — коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора
$k_{пр2}$ — коэффициент приведения тока кольца к току стержня
$k_{р}$ — коэффициент распределения обмотки
$k_{с}$ — коэффициент заполнения сердечника сталью
$k_{ск}$ — коэффициент скоса пазов
$k_{тр}$ — коэффициент трансформации э. д. с. и тока
$k_{т.щ}$ — коэффициент трения щеток
$k_{у}$ — коэффициент укорочения обмотки
$k_{ф}$ — коэффициент формы поля
$k_{δ}$ — коэффициент воздушного зазора
$k_{δд}$ — коэффициент воздушного зазора для добавочного полюса
L — индуктивность обмоток, Г
$L_{з1}$ — расчетная длина магнитной силовой линии в зубце статора и наконечника главного полюса, мм
$L_{з2}$ — расчетная длина магнитной силовой линии в зубце ротора и якоря, мм
$L_{п}$ — расчетная длина магнитной силовой линии в сердечнике полюса, мм
$L_{с1}$ — расчетная длина магнитной силовой линии в спинке статора и в станине, мм
$L_{с2}$ — расчетная длина магнитной силовой линии в спинке ротора и якоря, мм
$l_{б}$ — длина бандажной канавки якоря, мм
$l_{в}$ — длина вылета лобовой части обмотки, мм
$l_{д}$ — длина сердечника добавочного полюса, мм
$l_{к}$ — длина активной части коллектора; длина радиального вентиляционного канала, мм
$l_{кл}$ — длина короткозамыкающего кольца ротора, мм
$l_{л}$ — средняя длина одной лобовой части секции обмотки; длина лопатки вентилятора, мм
$l_{п}$ — длина сердечника главного полюса, мм
$l_{п1}$ — длина пакета сердечника статора, мм
$l_{п2}$ — длина пакета сердечника ротора и якоря, мм
$l_{н.д}$ — длина наконечника добавочного полюса, мм
$l_{ср.д}$ — средняя длина витка обмотки добавочных полюсов, мм
$l_{ср.д1}$ — средняя длина соединительной дуги стержневой компенсационной обмотки, мм
$l_{ср.с}$ — средняя длина витка последовательной обмотки главных полюсов, мм

$l_{ср.ш}$ — средняя длина витка параллельной и независимой обмотки возбуждения, мм
$l_{ср1}$ — средняя длина витка обмотки статора и секционной компенсационной обмотки, мм
$l_{ср2}$ — средняя длина витка обмотки ротора и якоря, мм
$l_{ст}$ — длина стержня ротора и компенсационной обмотки, мм
$l_{щ}$ — длина щетки, мм
$l_{эф.п}$ — эффективная длина сердечника главных полюсов, мм
$l_{эф1}$ — эффективная длина сердечника статора и шихтованной станины, мм
$l_{эф2}$ — эффективная длина сердечника ротора и якоря, мм
l_1 — конструктивная длина сердечника статора и длина станины, мм
l'_1 — расчетная длина сердечника статора, мм
l_2 — конструктивная длина сердечника ротора и якоря, мм
l'_2 — расчетная длина сердечника ротора и якоря, мм
M — вращающий момент, Н·м, Н·см
m — число фаз; число ходов обмотки якоря
$N_в$ — число проводников, лежащих рядом по высоте в пазу и в катушке возбуждения
$N_л$ — число лопаток вентилятора
$N_п$ — число эффективных проводников в пазу
$N_{ур}$ — число уравнительных соединений обмотки якоря
$N_ш$ — число проводников, лежащих рядом по ширине в пазу и в катушке возбуждения
$N_щ$ — число щеток в двигателе
$N_{щ.б}$ — число щеток на одном бракете
N_1 — число стержней компенсационной обмотки, приходящихся на один полюс
N_2 — число проводников обмотки фазного ротора и якоря
n — частота вращения, об/мин
$n_б$ — число бандажных канавок якоря
$n_к$ — число аксиальных или радиальных канавок в сердечнике
$n_п$ — число пакетов сердечника
$n_р$ — число продольных ребер на внешней поверхности статора
n_0 — частота вращения при холостом ходе, об/мин
n_1 — синхронная частота вращения, об/мин
P' — расчетная (внутренняя) мощность двигателя, В·А, Вт
$P_{вен}$ — потери на трение о воздух и на вентиляцию двигателя, Вт
$P_д$ — добавочные потери, Вт
$P_{з1}$ — магнитные потери в зубцах статора, Вт
$P_{з2}$ — магнитные потери в зубцах ротора и якоря, Вт
$P_к$ — потери короткого замыкания, Вт
$P_{к.щ}$ — электрические потери в контакте щеток, Вт
$P_{м.д}$ — электрические потери в обмотке добавочных полюсов, Вт
$P_{м.д1}$ — электрические потери в дугах компенсационной обмотки, Вт
$P_{м.с}$ — электрические потери в последовательной обмотке главных полюсов, Вт
$P_{м.ст1}$ — электрические потери в стержнях компенсационной обмотки, Вт
$P_{м.ш}$ — электрические потери в параллельной или независимой обмотке возбуждения, Вт
$P_{м1}$ — электрические потери в обмотке статора и в секционной компенсационной обмотке, Вт
$P_{м2}$ — электрические потери в обмотке ротора и якоря, Вт
$P_{с1}$ — магнитные потери в спинке статора и в наконечнике главного полюса, Вт
$P_{с2}$ — магнитные потери в спинке ротора и якоря, Вт
$P_{т.п}$ — потери на трение в подшипниках, Вт
$P_{т.щ}$ — потеря на трение щеток о коллектор, Вт
$P_{эм}$ — электромагнитная мощность, Вт
P_0 — потери холостого хода, Вт
P_1 — подводимая мощность, Вт
P_2 — полезная мощность (мощность на валу двигателя), Вт
P'_2 — механическая мощность ротора, Вт
p — число пар главных полюсов
$p_д$ — число пар добавочных полюсов
$Q_в$ — расход охлаждающего воздуха, м³/с
$Q_д$ — площадь поперечного сечения сердечника добавочного полюса, мм²
$Q_{з1}$ — площадь поперечного сечения зубцов статора и зубцов наконечника главного полюса, мм²
$Q_{з2}$ — площадь поперечного сечения зубцов ротора и якоря, мм²
$Q_п$ — площадь поперечного сечения сердечника главного полюса; площадь поперечного сечения паза в штампе, мм²
$Q'_п$ — площадь поперечного сечения паза в свету, мм²
$Q''_п$ — площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой, мм²
$Q_{с1}$ — площадь поперечного сечения спинки статора и станины, мм²
$Q_{с2}$ — площадь поперечного сечения спинки ротора и спинки якоря, мм²
$Q_δ$ — площадь поперечного сечения в воздушном зазоре, мм²
q — площадь поперечного сечения провода без изоляции, мм²

q' — площадь поперечного сечения провода с изоляцией, мм²

$q_д$ — площадь поперечного сечения провода обмотки добавочных полюсов, мм²

$q_{д1}$ — площадь поперечного сечения дуги компенсационной обмотки, мм²

$q_{кп}$ — площадь поперечного сечения короткозамыкающего кольца, мм²

q_c — площадь поперечного сечения провода последовательной обмотки главных полюсов, мм²

$q_{ст}$ — площадь поперечного сечения стержня ротора и компенсационной обмотки, мм²

$q_{ур}$ — площадь поперечного сечения провода уравнительных соединений якоря, мм²

$q_ш$ — площадь поперечного сечения провода параллельной и независимой обмотки возбуждения, мм²

q_1 — площадь поперечного сечения провода секционной компенсационной обмотки, мм²; число пазов на полюс и фазу в статоре

q_2 — число пазов на полюс и фазу в роторе

$R_м$ — активное сопротивление схемы замещения при максимальном моменте, Ом

$R_к$ — активное сопротивление схемы замещения, Ом

$r_д$ — активное сопротивление обмотки добавочных полюсов, Ом

$r_{д1}$ — активное сопротивление дуг компенсационной обмотки, Ом

$r_к$ — расчетное приведенное активное сопротивление короткого замыкания, Ом

$r_{кл}$ — активное сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, Ом

$r_м$ — активное сопротивление намагничивающего контура, Ом

r_c — активное сопротивление последовательной обмотки главных полюсов, Ом

$r_{ст}$ — активное сопротивление стержня ротора и стержней компенсационной обмотки, Ом

$r_ш$ — активное сопротивление параллельной и независимой обмотки возбуждения, Ом

r_1 — активное сопротивление фазы обмотки статора и компенсационной обмотки, Ом

r_2 — активное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора, фазы обмотки фазного ротора и обмотки якоря, Ом

r'_2 — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом

S — поверхность охлаждения, мм²

$S_щ$ — контактная площадь одной щетки, мм²

s — скольжение

$s_м$ — скольжение при максимальном моменте

$T_м$ — электромеханическая постоянная времени двигателя, с

$T_э$ — электромагнитная постоянная времени двигателя, с

$t_к$ — коллекторное деление, мм

t_1 — зубцовое деление статора и наконечника главного полюса, мм

t_2 — зубцовое деление ротора и якоря, мм

U — напряжение сети, В

$U_в$ — напряжение независимого возбуждения, В

$U_{кл}$ — напряжение на кольцах ротора, В

U_0 — напряжение холостого хода, В

U_1 — напряжение фазы статора, В

$u_к$ — напряжение короткого замыкания; напряжение между коллекторными пластинами, В

$v_{вен}$ — окружная (линейная) скорость вентилятора, м/с

$v_к$ — окружная (линейная) скорость коллектора, м/с

v_2 — окружная (линейная) скорость ротора и якоря, м/с

$w_д$ — число витков на полюс обмотки добавочных полюсов

w_c — число витков на полюс стабилизирующей последовательной обмотки главных полюсов

$w_{с2}$ — число витков в секции обмотки якоря

$w_ш$ — число витков на полюс параллельной и независимой обмотки возбуждения

w_1 — число последовательно соединенных витков в фазе обмотки статора; число витков на полюс компенсационной обмотки

w_2 — число последовательно соединенных витков в фазе обмотки ротора; общее число витков обмотки якоря

$x_к$ — расчетное приведенное индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом

$x_м$ — главное индуктивное сопротивление, Ом

x_1 — индуктивное сопротивление обмотки фазы статора, Ом

x_2 — индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом

x'_2 — индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом

y — результирующий шаг обмотки по элементарным пазам обмотки якоря

$y_к$ — шаг по коллектору

$y_п$ — шаг обмотки по реальным пазам

$y_{ур}$ — шаг уравнительных соединений обмотки якоря

y_1 — первый частичный шаг по элементарным пазам обмотки якоря

y_2 — второй частичный шаг по элементарным пазам обмотки якоря

Z — эквивалентное аэродинамическое сопротивление воздухопровода, Н·с²/м⁸

$Z_м$ — полное сопротивление схемы замещения при максимальном моменте, Ом

$Z_н$ — полное сопротивление схемы замещения, Ом

Z_1 — число пазов в статоре и в наконечнике главного полюса

Z_2 — число пазов в роторе и якоре

$z_к$ — расчетное приведенное полное сопротивление короткого замыкания, Ом

z_∞ — расчетное приведенное полное сопротивление при бесконечно большом скольжении ($s=\infty$), Ом

α — коэффициент теплоотдачи с поверхности, Вт/(мм²·°С)

α' — расчетный коэффициент полюсной дуги

γ — число коллекторных пластин, перекрытых щеткой

γ_ϑ — удельная электрическая проводимость материала проводников при расчетной рабочей температуре, См/мкм

$\Delta_{шт}$ — припуск на штамповку, мм

ΔU — падение напряжения в обмотках якорной цепи, В

$\Delta U_щ$ — падение напряжения в контакте щеток, В

$\Delta\theta$ — превышение температуры обмоток, коллектора, воздуха и перепад температуры в изоляции, °С

δ — воздушный зазор между сердечниками статора и ротора, между якорем и главным полюсом, мм

$\delta_д$ — воздушный зазор между якорем и добавочным полюсом, мм

$\delta_{п1}$ — зазор между главным полюсом и станиной, мм

η — коэффициент полезного действия, о. е., %

ϑ — расчетная рабочая температура обмотки, °С

λ — отношение длины сердечника к его диаметру; коэффициент теплопроводности изоляции

$\lambda_{д1}$ — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния статора

$\lambda_{д2}$ — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния клетки ротора

$\lambda_{кл}$ — коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец ротора

$\lambda_{л1}$ — коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора

$\lambda_{п1}$ — коэффициент проводимости рассеяния паза статора

$\lambda_{п2}$ — коэффициент проводимости рассеяния паза ротора

$\lambda_{ск}$ — коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов

λ_1 — коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора

λ_2 — коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора

ξ — параметр, характеризующий степень повышения активного и уменьшения индуктивного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора

ρ_1 — коэффициент сопротивления статора

$П$ — периметр поперечного сечения охлаждаемой поверхности, мм

ΣF — м. д. с. магнитной цепи на один полюс, А

$\Sigma G_м$ — суммарная масса меди, кг

$\Sigma G_с$ — суммарная масса активной стали, кг

$\Sigma I_п$ — ток в пазу, А

ΣP — суммарные потери в двигателе, Вт

$\Sigma P_{мх}$ — суммарные механические потери, Вт

$\Sigma P_{с}$ — суммарные магнитные потери в стали, Вт

$\Sigma S_щ$ — контактная площадь всех щеток двигателя, мм²

Σr_ϑ — сумма сопротивлений обмоток якорной цепи, приведенных к расчетной рабочей температуре, Ом

σ — коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов

$\sigma_д$ — коэффициент магнитного рассеяния добавочных полюсов

$\sigma_{н\,п}$ — коэффициент магнитного рассеяния наконечников главных полюсов

τ — полюсное деление, мм

τ_1 — коэффициент рассеяния статора

Φ — магнитный поток в воздушном зазоре (для асинхронного двигателя — основная гармоническая), Вб

$\Phi_д$ — магнитный поток в сердечнике добавочного полюса, Вб

$\Phi_{\delta д}$ — магнитный поток в воздушном зазоре под добавочным полюсом, Вб

φ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления пазовой части стержня ротора при вытеснении тока

φ' — коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А. Е.* Конструкция электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1958. 390 с.
2. *Расчет* серий асинхронных двигателей на автоматической цифровой вычислительной машине. М., ЦИНТИ электропромышленности, 1962. 71 с. Авт.: Л. М. Артамонова, Ю. В. Мордвинов, Е. В. Пломодьяло, Т. Г. Сорокер.
3. *Борисенко А. И., Данько В. Г., Яковлев А. И.* Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. М., «Энергия», 1974. 559 с.
4. *Вольдек А. И.* Электрические машины. Л., «Энергия», 1974. 839 с.
5. *Гольдберг О. Д.* Качество и надежность асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1968. 176 с.
6. *Гурин Я. С., Курочкин М. Н.* Проектирование машин постоянного тока. М., Госэнергоиздат, 1961. 351 с.
7. *Даниленко С. Е.* Некоторые математические методы оптимального проектирования. — В кн.: Математические методы решения электротехнических задач. М., Информстандартэлектро, 1968, с. 3—6.
8. *Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М.* Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л., «Энергия», 1974. 503 с.
9. *Иоффе А. Б.* Тяговые электрические машины. М., «Энергия», 1966. 247 с.
10. *Основные* проблемы автоматизации проектирования серий электрических машин. — В кн.: Третья научно-техническая конференция (доклады). М., ВНИИЭМ, 1968, 1971, с. 313—324. Авт.: Б. М. Каган, А. А. Бердичевский, С. Е. Даниленко, В. Д. Розенкноп.
11. *Костенко М. П.* Круговая диаграмма и соответствующая ей эквивалентная схема асинхронной машины. — «Вестник электропромышленности», 1930, № 4, с. 33—40.
12. *Костенко М. П., Кузнецов Б. И.* Основания теории и расчета двигателей Бушеро. — «Бюллетень Всесоюзного электротехнического объединения», 1930, № 7, с. 107—115; № 8, с. 135—143.
13. *Костенко М. П., Пиотровский Л. М.* Электрические машины. Ч. I, 815 с., ч. II, 712 с. М., «Энергия», 1972.
14. *Кузнецов Б. И.* Диаграмма тока и графический метод расчета двигателя с глубоким пазом. — «Вестник электропромышленности», 1935, № 1, с. 17—25.
15. *Кузнецов Б. И.* О влиянии толщины изоляции на степень использования электрических машин. — «Вестник электропромышленности», 1958, № 4, с. 5—17.
16. *Кузнецов Б. И.* Метод предварительного определения главных размеров сердечника при проектировании серий асинхронных двигателей. — «Электротехника», 1968, № 5, с. 5—7.
17. *Кузнецов Б. И.* Асинхронные двигатели общего применения малой и средней мощности. Автореф. дис. на соиск. учен. степени доктора техн. наук. М., ВНИИЭМ, 1970. 59 с.
18. *Петров Г. Н.* Электрические машины. Ч. III. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. М., «Энергия», 1968. 223 с.
19. *Петров Г. Н.* Электрические машины. Ч. II. Асинхронные и синхронные машины. М., Госэнергоиздат, 1963. 416 с.
20. *Постников И. М.* Проектирование электрических машин. Киев, Гостехиздат, 1960. 910 с.
21. *Александров Н. А., Краснов В. Е.* Исследование асинхронных двигателей серии 4А при питании их от тиристорных преобразователей частоты. — «Труды ВНИИЭМ», 1976, т. 45, с. 122—126.
22. *Пунга Ф.* Проектирование электромашин. Л., «Кубуч», 1934. 325 с.
23. *Рабинович И. Н., Шубов И. Г.* Проектирование электрических машин постоянного тока. Л., «Энергия», 1967. 504 с.
24. *Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А.* Проектирование электрических машин. М., «Энергия», 1969. 632 с.

25. *Сорокер Т. Г.* Расчет характеристик асинхронного двигателя. — «Бюллетень Всесоюзного электротехнического института», 1941, № 6, с. 27—32.
26. *Сорокер Т. Г.* Поверочный электрический расчет многофазного асинхронного двигателя. — «Труды ВНИИЭМ», 1959, т. 3, с. 112.
27. *Сорокер Т. Г., Воскресенский А. П., Мордвинов Ю. В.* Применение ЦВМ для расчета и исследований асинхронных двигателей. — В кн.: Третья научно-техническая конференция. М., ВНИИЭМ, 1971, с. 131—144.
28. *Beier E., Schuler W.* Innengekühlte Gleichstrommotoren für Stromrichlerspeisung im Drehmomentbereich von 75 bis 450 Nm. — «Siemens Zeitschrift», 1974, T-4, S. 257—261.
29. *Beier E., Schuler W.* Oberflächengekühlte Gleichstrommotoren für Stromrichlerspeisung im Drehmomentbereich von 75 bis 600 Nm. — «Siemens Zeitscrift», 1974, T-4, S. 261—264.
30. *Bloch O.* Die Ortskurven der graphischen Wechselstromtechnik. Verlag von Rascher &. Co. In Zürich, 1917, S. 163.
31. *A new* concept in motor design for efficient production. — «Electrical Review», 1975, vol. 196, № 14, p. 430—432.
32. *Ciganek L.* Eine Einheitsgleichung der Kurzschlusskennlinie des gesättigten Asynchronmotors. — «Elektrotechnicky časopis», 1974, vol XXV, № 9—10, S. 690—700.
33. *Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Кравчик Э. Д.* Обмотки статора низковольтных асинхронных двигателей, предназначенные для механизированной укладки.— «Электротехника», 1976, № 10, с. 30—32.
34. *Подшипники* качения. Каталог-справочник. М., НИИНавтопром, 1972, 469 с.
35. *Шенфер К. И.* Динамомашины и двигатели постоянного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1934. 384 с.
36. *Шенфер К. И.* Асинхронные машины. М.—Л., ГОНТИ, 1938. 412 с.
37. *Бернштейн Л. М.* Изоляция электрических машин общепромышленного применения, М., «Энергия», 1971. 367 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Яков Семенович Гурин

Борис Иванович Кузнецов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕРИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Редактор Э. П. Климеико
Редактор издательства Л. А. Решмина
Переплет художника А. М. Кувшинникова
Художественный редактор Д. И. Чернышев
Технический редактор А. М. Сатарова
Корректор З. Б. Драновская
ИБ № 1242

Сдано в набор 24.04.78 Подписано к печати 03.07.78 Т-11151
Формат 70×100 1/16 Бумага типографская № 3 Гарн. шрифта литературная Печать высокая Усл. печ. л. 39,0 Уч.-изд. л. 38,71
Тираж 12 000 экз. Зак. 641 Цена 2 р. 60 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10